

ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ  
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Ган Олена Валеріївна**

УДК 624.138 + 622.235

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАРЯДІВ СПІНЕНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКОГО МАСИВУ**

Спеціальність 05.15.09 – Геотехнічна і гірнича механіка

18 – Виробництво технології

**Технічні науки**

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О.В. Ган

Науковий керівник Бойко Віктор Вікторович д.т.н., проф.

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Ган Олена Валеріївна. Вдосконалення зарядів спінених вибухових речовин для ущільнення структурно-нестійкого масиву – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – Геотехнічна і гірнича механіка. – Інститут гідромеханіки Національної академії наук України – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

В роботі в якості предмета досліджень обрано закономірності і способи формування параметрів вибухового імпульсу зарядів малощільних спінених вибухових композицій в технологіях ущільнення структурно-нестійких ґрунтів. В дисертації на основі запропонованих і вдосконалених рецептур малощільних спінених вибухових композицій, оброблених ультразвуковим випромінюванням з метою формування необхідних вибухових параметрів, вперше дозволило в комплексі із запропонованим способом приготування та розробленим пристроєм для формування накладних, подовжених та вертикальних зарядів по всій ущільнюючій площі під забудову, проводити вибухові роботи щодо забезпечення стійкості структурно-нестійких ґрунтів.

Особливу увагу приділено впливу ультразвукового випромінювання на структуру і фізико-механічні характеристики аміачної селітри та на детонаційні характеристики спінених вибухових композицій з метою забезпечення стабільності запропонованих сумішевих спінених композицій і встановлено, що після обробки ультразвуковим випромінюванням гранул різних типів аміачної селітри (АС) суттєво збільшується її утримуюча здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яка виникає в наслідок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС. Водночас цей вплив носить нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин

утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Це підтверджується максимальним перерозподілом відкритої і закритої пористості. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

Аналогічна картина спостерігається при дослідженні динамічних характеристик спінених вибухових речовин (ВР) після обробки ультразвуковим випромінюванням, а саме: дещо збільшуються швидкість наростання тиску в імпульсі; значно покращуються динамічні характеристики, а добавка 3 – 4 % дисперсного алюмінію сприяє покращенню додатково фізичної стабільності.

В ході мікроскопічного дослідження зовнішньої та внутрішньої структури сколу гранул (частинок) аміачної селітри було виявлено що наявні на поверхні пори знаходяться в межах від 3 % до 8 % і ця частина поверхні існуючих пор гранули залишається не реалізованою, оскільки вона знаходиться в закритому вигляді.

Відомо, що одним із методів керування вибухом у ґрунтовому масиві є оптимізація амплітудно-часових параметрів вибухового імпульсу. Тому в роботі теоретично розглянуто вибуховий імпульс на межі розподілу ВР – ґрунтовий масив для вдосконалених спінених ВР у порівнянні зі штатними, а саме амонітом №6 ЖВ та ігданітом і встановлено, що максимальний тиск спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням на 49 % менше за амоніт №6 ЖВ і на 40 % за ігданіт. При цьому максимальна тривалість вибухового імпульсу на межі «продукти детонації – середовище» для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням дещо більша ніж в 3 рази. У зарядах на основі спінених ВР головна частина вибухового імпульсу має мінімальне пікове значення тиску і максимальну тривалість, як для ВР з найменшою швидкістю детонації і найбільшою шириною зони хімічної реакції. При цьому тиск спіненої ВР після обробки ультразвуковим

випромінюванням дещо менший, ніж у звичайної спіненої ВР, але при цьому менша тривалість вибухового імпульсу.

Характер розповсюдження вибухових хвиль у ґрунтовому середовищі для структурно-нестійких ґрунтів носить наступний характер – на границі з порожниною при вибуху заряду ігданіту досягаються значно більші значення гідростатичного тиску та максимальної об'ємної деформації, ніж при вибуху спіненої ВР. Це пояснюється більш високими детонаційними характеристиками ігданіту. Крім того, на відстанях більших  $40\text{ }g_0$  найбільші тиск і об'ємні деформації досягаються при вибухах спінених ВР. При чому, для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, залишкова деформація більша, ніж при вибуху звичайної спіненої ВР на 9–10 %.

Дослідження ступеня ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вибуховим способом за допомогою накладних зарядів та зустрічних похилих свердловин показали, що оптимальний кут нахилу свердловин знаходиться в межах від  $20$  до  $30^\circ$ . Поверхневі накладні заряди забезпечують ущільнення ґрунтового масиву на глибину до  $2,0\text{ м}$  для ігданіту та на глибину до  $3,0\text{ м}$  для малощільної ВР при потужності заряду  $100\text{ мм}$ .

Експериментально встановлено, що спінені вибухові композиції забезпечують ущільнення просадних лесових ґрунтів на більшу глибину масиву, що становить  $27\text{--}30$  потужностей заряду у порівнянні з ігданітом, який забезпечує ущільнення на глибину до  $20\text{--}25$  потужностей заряду. Причому, саме ущільнення носить пульсуючий характер. Тобто, спочатку спостерігається різкий скачок щільності. Після чого відбувається деякий спад, і знову підвищення щільності. З глибиною ця пульсація затухає. Така поведінка ущільнення ґрунтового масиву пояснюється тим, що під час вибуху, по мірі розповсюдження детонації вздовж заряду, виділяється значна кількість газів, яка діє в глиб ґрунтового масиву. При цьому утворюється зона ущільнення. Після того, як гази продуктів детонації перестають діяти на ґрунтовий масив, відбувається зворотний ефект, тобто утворюється зона розвантаження, яка призводить до зниження щільності. Характер самої

амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда.

Завдяки отриманим результатам компресійних досліджень встановлено, що при регулюванні ступенем ущільнення можна забезпечити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості структурно-нестійких ґрунтів.

Розроблено та запропоновано пристрої для приготування вибухових композицій, в яких механічне змішування розчину ПАР і аміачної селітри проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежекування повітря потоком суміші з прямоточною видачею спіненої вибухової композиції до місця застосування. Цим досягається підвищення безпеки робіт, оскільки неспінена суміш розчину ПАР і аміачної селітри не чутлива до удару і тертя, а вибухові властивості цієї суспензії проявляються тільки після насичення суміші бульбашками повітря при виході потоку піносуспензії з ежектора.

Такі пристрої дозволяють виготовляти водонаповнені спінені вибухові композиції місцевого приготування, як з попередньо обробленою АС ультразвуком, так і саму суспензію до процесу її спінювання. Крім того, забезпечують можливість застосування добавки дисперсного компоненту у вигляді алюмінію.

Результатом впровадження рекомендацій дисертаційної роботи у виробничих умовах ТОВ «ЕКО-БУД-ТРЕЙД» при ущільненні структурно-нестійкого масиву у порівнянні із цементацією отримано загальний економічний ефект, що становить 12163,4 грн.

*Ключові слова:* ультразвукове випромінювання, утримуюча здатність, спінені вибухові композиції, структурно-нестійкий ґрунт, ступінь ущільнення, вибуховий імпульс, тривалість імпульсу, час зростання імпульсу, пристрій для

приготування вибухових композицій, детонаційні характеристики, піковий тиск, деформаційні процеси, площині заряди.

## ABSTRACT

**Olena Han. Improving the charges of foamy explosives to compact structurally unstable soil** - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

O.V. Han. Thesis for a Candidate of Technical Sciences (Ph.D in Technical Science), specialty 05.15.09 - Geotechnical and Mining Engineering. Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» of the Ministry of education and science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The regularities and methods of forming the parameters of the explosive momentum of charges of low-density foamed explosive compositions in the technologies of compaction of structurally unstable soils are chosen as the subject of research. In the dissertation on the basis of the offered and improved compoundings of the low-density foamed explosive compositions processed by ultrasonic radiation for the purpose of formation of necessary explosive parameters that for the first time allowed in a complex with the offered way of preparation and the developed device for formation of to carry out blasting works to ensure the stability of structurally unstable soils.

Particular attention is paid to the effect of ultrasonic radiation on the structure and physico-mechanical characteristics of ammonium nitrate and detonation characteristics of foamed explosive compositions to ensure the stability of the proposed mixed foamed compositions and found that after ultrasonic treatment of granules for dense and porous speakers. At the same time, this effect is nonlinear. That is, in the first stage, when increasing the sonication time to 4 minutes, the holding capacity of ammonium nitrate increases and is the maximum. This is confirmed by the maximum redistribution of open and closed porosity. A further

increase in the ultrasonic processing time of the speaker leads to a decrease in its holding capacity. This pattern is observed for both porous and dense speakers.

A similar pattern is observed in the study of the dynamic characteristics of foam explosives after treatment with ultrasonic radiation, namely a slightly increased rate of pressure rise pulse; significantly improved dynamic performance, a supplement of 3 - 4% particulate aluminum improves further physical stability.

During the microscopic examination of the external and internal structures cleavage granules (particles) of ammonium nitrate was found that existing on the surface of the pores are in the range of 3% to 8% and that of the surface pores existing pellet is not implemented because it is sealed.

It is known that one of the methods of explosion control in the soil massif is the optimization of the amplitude-time parameters of the explosion pulse. Therefore, the article theoretically considers the impulse of the explosion at the boundary of the explosive – soil mass distribution for advanced foamed explosives compared to conventional ones, namely ammonite and igdanite, and found that the maximum pressure of the foamed explosive treated with ultrasonic explosives 49 % amonit and 40 % for ignadite. The maximum duration of the explosive pulse at the "detonation products - medium" boundary for foamed explosives treated with ultrasonic radiation is slightly more than 3 times. In charges based on foamed explosives, the main part of the explosive pulse has a minimum value of peak pressure and maximum duration, as for explosives with the lowest detonation rate and the largest width of the chemical reaction zone. The pressure of the foamed explosive after treatment with ultrasonic radiation is slightly lower than that of a conventional foamed explosive, but the duration of the explosive pulse is shorter.

The nature of the propagation of explosive waves in the soil environment for structurally unstable soils is as follows - at the boundary with the cavity in the explosion of the charge of igdanite are achieved much higher values of hydrostatic pressure and maximum volumetric deformation than in the explosion of foamed explosives. This is due to the higher detonation characteristics of igdanite. In addition, at distances greater than  $40 r_0$ , the highest pressures and volumetric

deformations are achieved during explosions of foamed explosives. Moreover, for the foamed explosive treated with ultrasonic radiation, the residual deformation is greater than in the explosion of conventional foamed explosives by 9–10%.

Research degree of compaction structurally unstable soils using blasting using overhead and counter-prone wells showed that the optimal angle wells is in the range of 20 to 30 °. Surface charges of providing sealing mass of soil to a depth of 2.0 m for igdanite and a depth of 3.0 m for explosives with low charge density at a power of 100 mm.

It has been experimentally established that foamed explosive compositions provide compaction of subsidence loess soils to a greater depth of the massif, which is 27–30 charge capacities in comparison with igdanite, which provides compaction to a depth of up to 20–25 charge capacities. Moreover, the seal itself is pulsating. That is, at first there is a sharp jump in density. Then there is some decline, and again an increase in density. With depth, this pulsation attenuates. This behavior of compaction of the soil mass is explained by the fact that during the explosion, as the detonation spreads along the charge, a significant amount of gases is released, which acts deep into the soil mass. At the same time the zone of consolidation is formed. After the gases of the detonation products cease to act on the soil mass, the opposite effect occurs, ie an unloading zone is formed, which leads to a decrease in density. The nature of the amplitude of the density pulsation depends on the parameters of the BP pulse, ie, the lower the pressure at the front of the detonation wave and the longer its growth in the explosive pulse, the greater the amplitude.

Due to the results obtained compression studies found that when adjusting the degree of compaction can provide the required performance characteristics of deformation for sustainability structurally unstable soils.

Devices for preparation of explosive compositions have been developed and proposed, in which mechanical mixing of surfactant solution and ammonium nitrate is carried out in low-speed mode without foaming the mixture, supplying this suspension under pressure to the blasting object and dosed aeration due to ejection of air issuing a foamed explosive composition to the site of application. This



increases the safety of work, because the unfoamed mixture of surfactant solution and ammonium nitrate is not sensitive to impact and friction, and the explosive properties of this suspension are manifested only after saturation of the mixture with air bubbles at the exit of the foam suspension from the ejector.

Such devices allow the production of water-filled foamed explosive compositions of local preparation, both with pre-treated sonication of the speaker, and the suspension itself before the process of foaming. In addition, allow the use of additives dispersed component in the form of aluminum.

The result of the implementation of the recommendations of the thesis in a production environment "ECO-BUD-TRADE" at structurally unstable sealing mass compared with cementation received overall economic benefit, which is UAH 12,163.4.

*Keywords:* ultrasonic radiation, holding capacity, foamed explosive composition, structurally unstable soil, degree of compaction, explosive pulse, pulse duration, pulse rise time, device for preparation of explosive compositions, detonation characteristics, peak pressure, detonation of near-surface, shallow-buried explosives, deformation pressure.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Публікації у наукових фахових виданнях:*

1. В. В. Бойко, А. Л. Ган, та О. В. Ган, “Ущільнення просадних ґрунтів вдосконаленими зарядами малої щільності”, *Збірник наукових праць НГУ*, №55, С. 152-162. 2018. Доступно: URL: <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/17.pdf>

*(включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)*

*Особистий внесок дисертанта: запропоновано вдосконаліти малоцілні вибухові суміші для ущільнення просадних ґрунтів; досліджено ступінь ущільнення лесових ґрунтів вибуховим способом при застосуванні різних накладних зарядів на основі нових вдосконалених вибухових речовин.*

2. В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравець, та А. Л. Ган, “Вплив ультразвукового випромінювання на динамічні характеристики спінених вибухових композицій”, *Збірник наукових праць НГУ*, № 59, С. 56-65. 2019. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.056>

*(включено до баз даних «Google Scholar, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)*

*Особистий внесок дисертанта: встановлено вплив ультразвукового випромінювання на запропоновані спінені вибухові композиції місцевого приготування на основі рідких ПАР.*

3. В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравець, та А. Л. Ган, “Спосіб приготування та добір компонентного складу спінених вибухових композицій для ущільнення просадних ґрунтів”, *Технічна інженерія*, № 2(84), С. 126-132. 2019. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2019-2\(84\)-126-132](https://doi.org/10.26642/ten-2019-2(84)-126-132)

*(включено до баз даних «Google Scholar, Index Copernicus, DOAJ, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)*

*Особистий внесок дисертанта: запропоновано добір компонентного складу водонаповнених спінених вибухових композицій низької щільності;*

досліджено динамічні та фізико-технічні характеристики малоцілених спінених вибухових композицій.

4. О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Вапнічна, та Л. В. Шайдецька, “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення”, *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 6(119), С. 99-105. 2019. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.6.99-105

(включено до баз даних «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor», «Scientific Indexing Services», Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)

Особистий внесок дисертанта: проведені дослідження зі збільшення активної площі поверхні частинок (гранул) аміачної селітри (АС) під дією ультразвукового випромінювання; отримано залежність утримуючої здатності АС від часу обробки її ультразвуком для щільної та пористої аміачної селітри.

5. В.Г. Кравець, В.В. Бойко, А.Л. Ган, О.В. Ган, та О.С. Марченко, «Застосування енергії вибуху під час виконання спеціальних гірничо-будівельних робіт», науково-практичний журнал Сучасна спеціальна техніка МВС України ДНДІ, № 2(61), С. 135-150. 2020. DOI: doi.org/10.36486/mst2411-3816.2020.2(61)

(включено до баз даних «Index Copernicus International Journals», «Google Scholar», « Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)

Особистий внесок дисертанта: проведені розрахунки по досягненню рівномірного і ефективного ущільнення ґрунту всією глибиною оточуючого масиву за допомогою енергії вибуху.

6. O. Han, V. Boiko, V. Kravets, and A. Han, “Formation of parameters of foamed explosive mixtures for sealing soils”, *ScienceRise*, № 5, pp.6–12. 2020. DOI: <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001430>

(надруковано у виданні держави, що входять до ЄС (Естонія); включено до баз даних «Google Scholar, Index Copernicus International, iThenticate, CrossRef, WorldCat, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ulrich's Periodicals Directory, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського» та ін.)

*Особистий внесок дисертанта: розроблено та обґрунтовано принципи управління вибуховим імпульсом шляхом регулювання вмістом і щільністю вибухових речовин (ВР) за рахунок ультразвукового випромінювання і спінення малощільних вибухових сумішей.*

#### *Патенти на корисні моделі:*

7. В. В. Бойко, Ю. П. Приходько, В. К. Гончар, К. С. Золотухін, Ю. Ю. Орлов, В. І. Плужник, та О. В. Ган, “Пристрій для приготування водонаповненої вспіненої вибухової композиції“, МПК: E21C 37/00, UA № 122425, бюл. № 1, 10.01.2018 (Диплом, лауреата І премії, конкурсу «Краще видання року 2021» НАН ВО України). Доступно: <https://base.uipv.org/searchinv>

8. В. В. Бойко, Т. В. Хлевнюк, Л. В. Лавренов, О. В. Ган, та Ю. П. Приходько, “Спосіб приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту для ущільнення ґрунтів та розмінування місцевості”, МПК E21C 37/00 F41H 11/00, UA № 140360, бюл. № 4, 25.02.2020. Доступно: <https://base.uipv.org/searchinv>

#### *Публікації за матеріалами конференцій:*

9. В. В. Бойко, та О. В. Ган «Аналіз сучасних методів і способів усунення просідних властивостей лесових ґрунтів», на VIII міжнародній науково-технічній конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» «Перспективи розвитку гірничої справи та підземного будівництва», 1-3 червня 2016 р. Київ, С. 95-99.

Доступно: [https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf\\_2016.pdf](https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf_2016.pdf)

*Особистий внесок дисертанта: літературний аналіз, формування ідеї.*

10. О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Бойко, В. Г. Кравець, та В. В. Вапнічна, “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення”, на *II Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики»*, 30.05.2019, Київ [Електроний ресурс]

Доступно: <https://geobud.kpi.ua/conference/problemgeoingzhenerii2/772>

*Особистий внесок дисертанта: участь у лабораторних випробуваннях, проведення аналітичних та математичних обрахунків.*

*Публікації у періодичних виданнях:*

11. В. В. Бойко, О. В. Ган, та А. Л. Ган, “Дослідження параметрів вибухового імпульсу малоцільних вибухових сумішей для ущільнення просадних ґрунтів”, *Молодий вчений*, №12, С. 7-12. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-12-76-2>

*(включено до баз даних «Google Scholar, Research Bible, Index Copernicus, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського»)*

*Особистий внесок дисертанта: встановлено залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду для різних типів малоцільних вибухових речовин.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ .....	23
1.1 Способи ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів .....	23
1.2 Керування вибуховим імпульсом як спосіб дії на середовище .....	28
1.3 Аналіз застосування малощільних вибухових речовин при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів.....	32
1.4 Оцінка стану досліджуваного питання та задачі досліджень .....	37
Висновки по розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЦЕПТУР ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЩІЛЬНИХ ВР.....	43
2.1 Добір компонентного складу малощільних ВР підвищеної стабільності .	43
2.2 Формування вибухових характеристик вдосконалених малощільних ВР..	55
Висновки по розділу 2.....	57
РОЗДІЛ 3 ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	59
3.1 Вплив ультразвукового випромінювання на зовнішню та внутрішню структури гранул аміачної селітри .....	59
3.2 Забезпечення стабільності фізичних характеристик аміачної селітри за допомогою ультразвукового випромінювання .....	66
3.3 Формування вибухових параметрів спінених водонаповнених композицій оброблених ультразвуковим випромінюванням .....	85
Висновки по розділу 3.....	89
РОЗДІЛ 4 АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	91
4.1 Аналітичні оцінки можливостей керування параметрами вибухового імпульсу для регулювання впливу на ґрунтовий масив.....	91

4.2 Теоретичний розрахунок параметрів вибухового імпульсу на межі розподілу ВР – ґрунтовий масив .....	101
4.3 Результати математичного моделювання розповсюдження вибухових хвиль малощільних ВР в ґрунтовому масиві .....	110
Висновки по розділу 4.....	117
<b>РОЗДІЛ 5 ЛАБОРАТОРНІ І ПОЛІГОННІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ ВДОСКОНАЛЕНИМИ МАЛОЩІЛЬНИМИ ВР.....</b>	<b>120</b>
5.1 Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вдосконаленими малощільними ВР .....	120
5.2 Вплив зміни фізико-механічних характеристик на просадні властивості лесових ґрунтів .....	134
5.3 Розробка пристроїв і способу приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції .....	148
5.4 Техніко – економічні рекомендації ущільнення структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху .....	156
Висновки по розділу 5.....	163
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>166</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>169</b>
<b>ДОДАТОК А .....</b>	<b>182</b>
<b>ДОДАТОК Б .....</b>	<b>183</b>
<b>ДОДАТОК В.....</b>	<b>184</b>

## ВСТУП

В Україні лесові ґрунти займають 65 % всієї території, значна частина якої відведена під забудову. Головною особливістю структурно-нестійких ґрунтів є високий ступінь їх просідання (до 40 %) при зволоженні.

Існуючі методи і способи усунення просідних властивостей структурно-нестійких ґрунтів здійснюються:

- у межах верхньої зони просідності або її частини – важкими трамбівками, влаштуванням ґрунтових подушок, витрамбовуванням котлованів, хімічним або термічним закріпленням;

- у межах всієї просідної товщі – глибинним ущільненням ґрунтовими палями; глибинними вибухами з попереднім замочуванням ґрунтів основи, хімічним або термічним закріпленням.

Серед недоліків більшості наведених способів є працемісткість, тривалість виконання операцій, необхідність застосування матеріалів і спеціального обладнання, значна вартість. Останнє стосується найбільш продуктивних вибухових методів ущільнення через їх залежність від вартості традиційних промислових вибухових речовин з відповідними детонаційними характеристиками та з необхідністю дотримання умов безпеки цих робіт.

Застосування інтенсивних вибухових методів ущільнення ґрунтових масивів сприяло розвитку наукових аспектів динаміки ґрунтів, яка розглядає першочергово механізм формування полів напружень і деформацій в масиві в залежності від режиму його динамічного навантаження. Згідно з основними засадами динаміки ґрунтових масивів ефективний імпульсний режим ущільнення структурно слабкого ґрунту полягає в зниженні максимуму пікового навантаження з одночасним збільшенням тривалості дії імпульсу. Штатні вибухові речовини (ВР) з достатньо високими детонаційними параметрами за окремими виключеннями не задовольняють цій умові, що послугувало приводом досліджень, спрямованих на застосування спінених



малощільних, низькодетонаційних ВР для вирішення задач геодинаміки ґрунтових масивів.

Існує низка рецептур малощільних ВР на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри, розроблених в Інституті гідромеханіки НАН України, які досі не застосовувались у даній сфері. Одночасно ці малощільні ВР потребують удосконалення рецептур, підвищення чутливості до ініціювання, розробки способу приготування та пристрою для рівномірного покриття необхідної площі просадних ґрунтів під забудову, оскільки питання вдосконалення рецептур безтритилових вибухових речовин - малощільних спінених вибухових сумішей необхідно вирішувати в комплексі з механізацією їх виготовлення.

Ущільнення масивів структурно-нестійких ґрунтів таким способом можливе шляхом покриття поверхні шаром пінистої вибухової суспензії з підриванням вибухового композиту існуючими засобами ініціювання. Виходячи із вище зазначеного, удосконалення існуючих рецептур малощільних ВР і підсилення їх детонаційної чутливості з попередньою обробкою компонентів фізичними полями та розробка нових технологій при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів є **актуальною науковою задачею**.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Результати дослідження у дисертаційній роботі пов'язані з науково-дослідними темами Інституту гідромеханіки НАН України: «Дослідження процесів багатостадійного формування й розвитку в часі та просторі вибухових сейсмічних імпульсів з використанням короткоуповільненого підривання в гірництві» (2015-2018 р. р.) № ДР 0115U002104. «Дослідження по створенню вибухових технологій зі збереженням, поліпшенням та відновленням безпеки навколишнього середовища» (2019-2022 р. р.) № ДР 0115U002104. Результати компресійних досліджень ґрунтів виконувалась на кафедрі геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до

НДР: «Наукові основи ресурсозберігаючих технологій гірництва та геотехнічного будівництва» № ДР 0115U005398.

Виконана автором дисертаційна робота є складовою частиною досліджень відповідно до «Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року» (Закон України від 21 квітня 2011 року N 3268-VI).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є удосконалення фізичних характеристик спінених вибухових композицій для розробки нових технологій стабілізації структурно-нестійких ґрунтів.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі задачі:

- на основі існуючих рецептур безтротилових вибухових речовин вдосконалити малощільні спінені вибухові композиції з визначеними вибуховими параметрами для ущільнення структурно-нестійких ґрунтів;
- вивчити вплив ультразвукового випромінювання на структуру і фізико-механічні характеристики аміачної селітри та на детонаційні характеристики спінених вибухових композицій;
- дослідити закономірності формування параметрів вибухового імпульсу різних типів малощільних ВР та їх вплив на розвиток деформаційних процесів у ґрунтовому масиві;
- встановити вплив нових вдосконалених малощільних спінених вибухових композицій на просадні властивості ґрунтів та розробити пристрій і спосіб їх приготування з можливістю формування подовжених свердловинних та площинних поверхневих зарядів для ущільнення структурно-нестійкого масиву.

*Об'єктом досліджень* є процеси і технології ущільнення ґрунтів вибухом зарядів ВР з керованими детонаційними характеристиками.

*Предмет досліджень* – закономірності і способи формування параметрів вибухового імпульсу зарядів малощільних спінених вибухових композицій в технологіях ущільнення структурно-нестійких ґрунтів.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи застосовано наступний комплекс сучасних наукових методів досліджень: мікроскопічні дослідження виконувались за допомогою мікроскопу Ломо Метам Р-1, оснащеного CCD відеокамерою DigitalKOCOM; утримуюча здатність АС визначалась за допомогою статичного методу на основі дії сил тяжіння; дослідження ультразвукового випромінювання виконувались за допомогою ультразвукового генератора УЗГ5-1,6/22, оснований на акустичній кавітації; щільність ґрунту визначалась за допомогою методу «ріжучого кільця»; деформаційні характеристики лесових ґрунтів визначались за допомогою компресійних випробувань методом «двох кривих» та математичного моделювання із застосуванням моделі, на основі механіки суцільного середовища; експериментальні досліджень на модельних матеріалах та у полігонних умовах.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що в дисертаційній роботі вперше:

- на основі розрахунків термодинамічних параметрів запропоновано вдосконалені рецептури компонентного складу малощільної спіненої вибухової композиції місцевого приготування на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри для підвищення ефективності механічних методів ущільнення структурно-нестійких ґрунтів;

- отримано кількісну залежність відкритої пористості та утримуючої здатності різних типів АС від інтенсивності впливу ультразвукового випромінювання і встановлено, що при обробці ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин максимальна утримуюча здатність дизельного палива в пористій селітрі зростає з 4,416 % до 6,424 % або в 1,45 рази. Вплив ультразвукового поля на АС дозволяє підсилити на 10 % детонаційну чутливість компоненту в цілому;

- теоретично отримано залежність максимального тиску на фронті детонаційної хвилі для різних типів ВР від тривалості вибухового імпульсу,

яка свідчить про те, що найменший піковий тиск при найдовшій тривалості вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Максимальний тиск спіненої ВР на 33 % менший порівняно з амонітом №6 ЖВ і на 20 % за ігданіт. При обробці АС ультразвуковим випромінюванням максимальний тиск ВР на 49 % менший порівняно з амонітом №6 ЖВ і на 40 % – порівняно з ігданітом. Тривалість вибухового імпульсу для спіненої ВР в 3,5 рази більша за амоніт №6 ЖВ і ігданіт, а для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, дещо більша ніж в 3 рази. Час зростання тиску у вибуховому імпульсі зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням в 2,3 рази більший, ніж для амоніту №6 ЖВ і в 2,47 рази більший порівняно з ігданітом;

– експериментально підтверджено зростання на 20–35 % (що становить 5–7 потужностей шару плоского пінистого заряду) глибини ущільнення структурно-нестійкого ґрунту вибухом накладних зарядів спінених вибухових композицій на основі обробленої ультразвуком селітри у порівнянні з ігданітом.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичні результати роботи полягають в наступному:

– розроблено пристрої (отримано 2 деклараційних патенти) та способи приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції для ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів для цивільного й промислового будівництва;

– запропоновано спосіб розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100–200 м за один цикл з покриттям поверхні ґрунтового масиву шаром пінної суспензії потужністю 50–70 мм та смужкою шириною 5–10 м з подальшим підриванням площинного заряду пінного композиту ниткою ДШ. Технологія перспективна для ущільнення ґрунтових масивів під злітні смуги на польових летовищах шляхом переміщення пінного ствола уздовж злітної смуги.

**Впровадження** та пропозиції з використання отриманих результатів.

Результати дисертаційної роботи використані в методичних матеріалах дисциплін гірничого спрямування: розділ до лекційного курсу «Applied geophysics» («Прикладна геофізика»), розділ до лекційного курсу «Спеціальні способи будівництва» для студентів спеціальності 184 «Гірництво» (Додаток А), а також випробувано у виробничих умовах ТОВ «ЕКО-БУД-ТРЕЙД» при ущільненні структурно-нестійкого масиву (Додаток Б, В).

**Особистий внесок здобувача.**

Дисертація є самостійною і завершеною науково - дослідною роботою. Автором визначені мета і завдання досліджень, сформульовані основні наукові положення дисертаційної роботи: запропоновано вдосконалені малоощільні вибухові композиції для ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів на основі аміачної селітри [1, 67, 77,]; визначено фізико-хімічні характеристики запропонованих нових вдосконалених вибухових речовин та встановлено їх вплив на просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів [84, 110]; досліджено ступінь ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вибуховим способом при застосуванні накладних та свердловинних зарядів на основі нових вдосконалених вибухових композицій [109]; досліджено вплив ультразвукової обробки на утримуючу здатність та пористість як аміачної селітри, так і вибухової композиції в цілому [87, 97]; теоретично розраховано час зростання та тривалість вибухового імпульсу зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням [109]; запропоновано спосіб і пристрої для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції [133, 134], формування подовжених або свердловинних зарядів по всій ущільнюючій площі уздовж фронту виконання робіт [136].

Дисертаційна робота виконана у науково-дослідній лабораторії з проблем сейсмічної безпеки технологічних вибухів Інституту гідромеханіки НАН України під керівництвом д.т.н., проф. Бойко В.В. і на кафедрі геоінженерії Національного технічного університету України «Київський

політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» були виконані компресійні дослідження ґрунтів.

**Апробація результатів дисертації.** Окремі положення дисертаційної роботи доповідались на семінарах Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського: на VIII міжнародній науково-технічній конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» молодих вчених – аспірантів і магістрантів «Перспективи розвитку гірничої справи та підземного будівництва» (Київ, 2016); на II міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики» (Київ, 2019).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 11 наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР та Європейського Союзу), 1 стаття в інших виданнях України, 2 патенти України, 2 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінок. Основний зміст дисертації, що викладено на 153 сторінках, містить 42 рисунки, 22 таблиці та формули. Дисертація містить 3 додатки на 3 сторінках. Список використаних джерел налічує 137 найменувань.

Автор висловлює щиру подяку науковому керівнику доктору технічних наук, професору Бойко В.В. за постійну увагу до дисертаційної роботи та доктору технічних наук, професору Кравцю В.Г. за консультації під час її виконання.

## **РОЗДІЛ 1**

# **АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЛІКВІДАЦІЇ ПРОСАДНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ**

### **1.1 Способи ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів**

Найрозповсюдженими структурно-нестійкими в Україні є лесові ґрунти, які займають площу 13 млн. км<sup>2</sup>, що складає 9,3% всієї суші. В Україні лесові ґрунти займають 65% всієї території. Одна із основних ознак лесових ґрунтів – видимі неозброєним оком на зломі зразка ґрунту дрібні і крупні пори, а також вертикальні каналці (макропори). Тому такі ґрунти часто називають макропористими [1].

Властивості лесових ґрунтів головним чином визначаються: пористістю, щільністю ґрунту, щільністю мінеральних часток, вологістю, пластичністю, гранулометричним і мінералогічним складом, структурою і просадністю [1 – 4].

Існуючі методи і способи усунення просідних властивостей структурно-нестійких ґрунтів здійснюються:

- у межах верхньої зони просідності або її частини – важкими трамбівками, влаштуванням ґрунтових подушок, витрамбовуванням котлованів, хімічним або термічним закріпленням;

- у межах всієї просідної товщі – глибинним ущільненням ґрунтовими палями; глибинними вибухами з попереднім замочуванням ґрунтів основи, хімічним або термічним закріпленням.

Існують фізико-хімічні та фізико-механічні способи ліквідації просадочних властивостей структурно-нестійких ґрунтів. До фізико-хімічних відносять наступні способи [1, 5].

*Термічне закріплення ґрунтів.* М. О. Осташев у 1934 році для закріплення ґрунту запропонував використовувати нагріте повітря, яке під тиском нагнітається у свердловини. Пізніше роботи над цим способом продовжив проф. М. Литвинов. Термічне закріплення лесових просадних ґрунтів ґрунтується на тому, що нагріте попередньо повітря (температура 350...500°C) чи розпечені продукти згоряння нагнітаються під тиском у пори ґрунту через заздалегідь пробурені свердловини. Вони передають своє тепло навколишньому ґрунтовому масиву через пори і тріщини. Для збільшення в ґрунті фільтрації розпечених газів у свердловинах постійно підтримується надлишковий тиск від 0,15 до 0,5 атм. У результаті надлишкового тиску розпечені гази більш інтенсивно проникають у ґрунтову товщу і збільшують зону закріплення. Надлишковий тиск забезпечується повною герметизацією затвора, що щільно закриває верхню частину свердловини.

*Глинизація (кольматація).* Застосовується для закріплення лесових ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації 0,1—2 м/добу і пористістю 43—50%. Цей спосіб заснований на нагнітанні в ґрунт, через ін'єктори, глинистої суспензії в кількості 8—10% від ваги ґрунту. Усунення просадних властивостей лесових ґрунтів відбувається за рахунок заповнення всіх пор ґрунту глинистим розчином. Мікропори лесового ґрунту при глинизації частково або повністю заповнюються глинистим матеріалом. У результаті лесовий ґрунт здобуває властивості звичайного глинистого непросадного ґрунту, зменшуються його фільтраційні властивості, виникають нові зв'язки між частками й ізолюються від розчинення у воді існуючі в ґрунті цементуючі речовини.

*Силікатизація лесових ґрунтів.* Цей спосіб заснований на фізико-хімічній реакції між поглинаючим компонентом ґрунту і розчином силікату натрію. Метод силікатизації перший запропонував в 1944-1946 рр. В.В. Асколонов і застосовується не тільки при закріпленні деформованих основ, а й в передбудівельний період для створення фундаментів із закріплених ґрунтів. Пізніше цю технологію вдосконалили А. А. Акімов та В. Є. Соколович [1, 6, 7].



*Газова силікатизація лесових ґрунтів.* В результаті газової силікатизації лесових ґрунтів міцність закріпленого ґрунту збільшується в 1,5-2 рази. Об'єм закріпленого масиву при звичайній витраті силікатного розчину збільшується в 2 рази, а закріплений ґрунт стає більш водостійким. Радіус закріплення від одного ін'єктора становить від 0,7 до 1,0 м [8].

*Смолізація лесових ґрунтів.* У зв'язку з бурхливим розвитком хімії полімерів з'явилася можливість поліпшити будівельні властивості ґрунтів, додати їм такі позитивні якості, як підвищена міцність, водо- і морозостійкість, водонепроникність, непросадність, гідрофобність, підвищена стійкість до агресивних середовищ, довговічність і ін. З цією метою застосовують різні синтетичні смоли. Це дозволяє більш широко й ефективно використовувати зміцнені ґрунти як надійні основи будинків і споруд, протифільтраційних завіс, покриттів доріг, водонепроникних укосів каналів і водойм [9, 10].

*Закріплення лесових ґрунтів цементно – силікатними та іншими розчинами.* Порівняно новим методом закріплення ґрунтів є ін'єктування в нього цементно – силікатного розчину. При додаванні силікату натрію у цементний розчин покращується його структурна міцність тим більше, чим більша кількість цементу у розчині. Якщо такий розчин залишити у спокої, то міцність його структури буде збільшуватися протягом часу. Це явище пов'язано з прискоренням схоплювання цементу за рахунок силікату. Така характеристика цементно – силікатного розчину дуже корисна при закріпленні пливунів, водонасичених ґрунтів, водоізоляції підземних частин споруд [9, 11].

Фізико-механічні способи усунення просадних властивостей лесових ґрунтів складається в зниженні пористості попереднього ущільнення ґрунту різними способами.

*Поверхнєве ущільнення ґрунту трамбуванням.* Спосіб поверхнєвого ущільнення лесових ґрунтів трамбуванням запропонований Абелевим Ю.М. і Швецом В.Б. знайшов широке застосування при будівництві промислових і

житлових об'єктів у Дніпропетровську, Запоріжжі, Нікополеві й інших містах [12]. Вологість є одним з найголовніших чинників, що впливає на процес ущільнення ґрунтів. Залежність ступеня ущільнення ґрунтів від вологості було розглянуто ще Р. Проктором (США) в 1933 році [13].

Практикою встановлено, що для отримання достатньо ефекту ущільнення питомий статичний тиск трамбування на ґрунт повинна становити не менше 20 кПа [14], а ступінь вологості ґрунту повинна бути в межах від 0,35 до 0,60 [15 – 17].

*Влаштування ґрунтових подушок.* Для ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів у межах верхнього, найбільш напруженого шару основи споруд, застосовують ґрунтові подушки. Ґрунтові подушки зазвичай влаштовуються товщиною 1 – 4 м. Суть цього способу в заміні просадного ґрунту ґрунтом, що пошарово ущільнюється. Ґрунтові подушки дозволяють зменшити товщину просадного шару, створюють водонепроникний і непросадний екран і до деякої міри підвищують несучу здатність ґрунтової основи [18 – 20].

*Глибинне ущільнення ґрунтовими палями.* Цей спосіб був запропонований Ю.М. Абелєвим і доцільно застосовувати при товщині шару просадного ґрунту від 5 до 18 м, зі ступенем вологості ґрунту  $SR \leq 0,8$ . Суть глибинного ущільнення просадних ґрунтів ґрунтовими палями ґрунтується на витисненні ґрунту у боки при пробиванні в ньому свердловин станками ударно-канатного чи при розширенні свердловин енергією вибуху. Потім отримані свердловини набиваються ґрунтовим матеріалом [21 – 25].

Наступним етапом розвитку цього методу є використання енергії вибуху для влаштування свердловин [22, 23] і віброущільнення [24].

*Ущільнення просадних ґрунтів попереднім замочуванням.* При цьому способі попередньо зволожений ґрунт ущільнюється під власною вагою. Попереднє замочування застосовується на будівельних майданчиках із ґрунтовими умовами II типу, при просадних товщах більше 8 м (частіше понад 10 – 16 м), як правило, на знову забудовуваних ділянках. Будівлі і споруди,

розташовані поблизу, треба охороняти від замочування їх основ. Ділянку для попереднього замочування розташовують від існуючих споруд на відстані не менше триразової товщини шару просадних ґрунтів при наявності водоупору чи півтора разової товщини шару – при його відсутності [26, 27].

Згідно з експериментальними дослідженнями Абелєва Ю.М., Крутова В.І., Маєвича А.Є., Мустафаєва А.А., Аскарєва Х.А. та ін. просадна деформація в зволожуваних лесових ґрунтах виникає лише при певному значенні діючого стискаючого тиску [21, 28, 29].

Величину цього тиску прийнято називати "початковим тиском".

А.А. Мустафаєв "початковий тиск" представляє як межу пропорційності для лесового ґрунту і для його визначення виходить з наступного нелінійного зв'язку між відносною деформацією і напруженням [29]:

$$\varepsilon = \alpha \sigma^\beta$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  - параметри, які визначаються з компресійного випробування, що характеризують деформованість зволоженого лесового ґрунту.

Виходячи з умови, що при осіданні  $\varepsilon > 0,01$  і параметри  $\alpha$  і  $\beta$  залежать від вологості ґрунту, для "початкового тиску" отримана формула:

$$\sigma_n = \left[ \frac{0,01}{\alpha(W_{cp})} \right]^{1/\beta(W_{cp})}$$

Відомо, що властивості лесових ґрунтів в більшій мірі залежить від їх вологості [15].

Спосіб ущільнення просадних ґрунтів замочуванням, незважаючи на свою простоту, має істотні недоліки: велика витрата води на 1 м<sup>2</sup> площадки до 400 м<sup>3</sup>, тривалий час замочування для повної ліквідації просідання (місяці, роки), необхідність додаткового навантаження, неможливість застосування замочування поблизу існуючих споруд.

## 1.2 Керування вибуховим імпульсом як спосіб дії на середовище

Ефективність використання енергії вибуху при таких важливих практичних задачах, як: ущільнення структурно-нестійкого масиву, будівництво підземних об'єктів, руйнування гірських порід тощо, можна суттєво підвищити за рахунок керування механізмом розподілення енергії вибуху та збільшення при цьому коефіцієнту його корисної дії. Вибір методів і способів керування вибухом визначається характером його дії на середовище (ущільнення, подрібнення, переміщення, тощо).

Дія вибуху заряду ВР у середовищі характеризується імпульсом тиску в зарядній камері, який збуджує у середовищі імпульс напруження. Імпульси тиску і напружень визначаються двома параметрами: зміною величини тиску і напруження у часі і інтервалом часу прикладання навантаження. Інтегральною характеристикою величини напруження і тривалості її дії є форма імпульсу напруження. Під формою імпульсу напруження розуміють не зміну у часі величини  $I = \int_0^t \sigma(t) dt$ , а вигляд кривої  $\sigma(t)$ . Таким чином, форма імпульсу напруження характеризує особливості поведінки напруження у часі для конкретної точки середовища.

Форма вибухового імпульсу залежить від багатьох факторів. Але, при даному рівні вибухової справи можна керувати дією вибуху шляхом забезпечення необхідної форми вибухового імпульсу в зарядній камері (заряду) і імпульсу напруження в ґрунтовому масиві. Одним із шляхів такого керування є зниження амплітуди та збільшення тривалості вибухового імпульсу напруження.

Розробці методів керування вибуховим імпульсом напруження стосовно щодо подрібнення гірських порід енергією вибуху присвячені роботи М.В. Мельникова, Є.Ф. Кучерявого, О.А. Вовка, В.Г. Кравця та інших.

Оскільки однією з наших задач є дослідження та розробка методів керування вибуховим імпульсом при ущільненні структурно нестійких

масивів (лесових ґрунтів) з метою усунення їх просадних властивостей, зупинимося на аналізі деяких з цих методів керування.

На наш погляд розробка методів керування вибухом у ґрунтовому масиві може вестися за двома основними напрямками: перший – це оптимізація амплітудно-часових параметрів вибухового імпульсу з метою забезпечення максимального просторового розвитку зон ущільнення і другий – оптимізація швидкості деформації ґрунтового масиву, що впливає на ступінь та товщу її ущільнення.

Як правило, на практиці для керування вибуховим імпульсом застосовують наступні методи: короткоуповільнене підривання [30], використання повітряних проміжків та оболонок заряду [31], використання малоцільних низькобризантних вибухових речовин, зокрема спінених композицій. У всіх цих методах зменшення амплітуди вибухової хвилі супроводжувалося збільшенням тривалості дії напруження на оточуюче середовище. В одних випадках, це досягається за рахунок суперпозиції вибухових хвиль від окремих зарядів ВР, в інших – за рахунок забезпечення необхідного початкового стану продуктів детонації. При цьому, як показує практика проведення вибухових робіт, для кожного з цього методу існують оптимальні умови та сфера застосування, які забезпечують найбільшу ефективність ущільнення ґрунтового масиву.

Наприклад, в роботі [31] при вибуху у ґрунтовому масиві в зарядах застосовують повітряні оболонки, які найбільшого ефекту дають при вмісті їх 50% по об'єму від ВР для центральносиметричних і 150 % при асиметричних вибухах. При цьому автори встановили, що при вибуху поблизу заряду збільшення повітряної оболонки призводить до значного зменшення абсолютної величини тиску на відстанях від  $25-30 r_3$  для зосереджених до  $90-100 r_3$  для циліндричних зарядів.

Фізична суть вище розглянутих методів перерозподілу енергії вибуху полягає у тому, що внаслідок збільшення часових параметрів імпульсного впливу на середовище, частотний спектр хвиль напружень зсувається в

область низьких частот, а оскільки хвильові збурення на цих частотах загасають більш повільно, ніж на високих частотах, то розглянуті методи сприяють збільшенню зони напружено-деформованого стану ґрунтового масиву.

Крім того, підвищити ефективність застосування вибухової технології ущільнення масиву можна за рахунок зміни фізичного стану ґрунтів, зокрема вологості. При дослідженні ущільнення важкого пилюватого суглинку порушеної структури Ростовиков В.І. прикладав навантаження зі швидкістю від 0 до 5 Мн/м<sup>2</sup>с. Отримані результати проведених експериментів показали, що при збільшенні швидкості прикладання навантаження, деформування ґрунту при постійному тиску зменшується; збільшення вологості ґрунту приводить до зменшення його деформації; зі збільшенням швидкості прикладання навантаження збільшується стиснення самого ґрунту.

У своїх дослідженнях Р. Конднер встановив характер деформування зв'язаних ґрунтів при прикладанні на них статичного, вібраційного та ударного навантаження. Предметом вивчення був вплив швидкості прикладання навантаження на формування діаграми «напруження—деформація» для зв'язаних ґрунтів типу водонасичених глин відповідно до ядерного вибуху. На основі цих експериментів можна зробити висновок, що в'язкі властивості ґрунту з'являються у деякому діапазоні швидкостей прикладання навантажень, які обмежені статичними та граничними динамічними умовами прикладання навантаження [32].

Аналогічні висновки отримали в своїй роботі Мельников В.В. та Риков Г.В. [33], які досліджували вплив швидкості деформування на ущільнення лесових ґрунтів. Експерименти, які були проведені на одноосьовий стиск лесового ґрунту порушеної структури в умовах неможливості бокового розширення, показали наявність двох граничних діаграм стиснення: статичної ( $\epsilon \rightarrow 0$ ) та граничної динамічної ( $\epsilon = \epsilon_{\text{гран}} = \text{const}$ ). Вся сукупність діаграм на стиск, що відповідає різним швидкостям деформування, знаходиться в межах цих двох діаграм.

Пізніше Риков Г.В. більш детально розглядає вплив швидкості деформування на стисливість і стиск піщаних і глинистих ґрунтів при короткотривалому навантаженні. Отримані результати свідчать про значний вплив швидкості деформування на їх ущільнення при прикладанні навантаження і практично відсутність такого впливу на розвантаження і міцність ґрунтового масиву. При цьому автор обмежується лише якісним описанням отриманих в'язких ефектів у ґрунтах при динамічному навантаженні без встановлення кількісних закономірностей.

У працях Вовка О.А., Черного Г.І., Кравця В.Г. приділяється увага на залежність об'ємних деформацій та значення коефіцієнта Пуассона ґрунтів від тривалості дії імпульсу тиску при вибуху зарядів у суглинках. Авторами встановлено, що зі збільшенням часу дії тиску коефіцієнт Пуассона у ґрунтах лінійно збільшується, при цьому продовжується розвиток деформацій ґрунтів поза фронтом ударної хвилі.

Результати експериментальних досліджень Г.І. Покровського, Г.М. Ляхова, В.В. Мельнікова, Г.В. Рикова, та інш. по вивченню впливу в'язких властивостей на закономірність розповсюдження вибухових хвиль були узагальнені Г.М. Ляховим та запропонована ним модель, яка враховує пластичні та в'язкі властивості ґрунтів і гірських порід. В цій моделі хвильові процеси розглядаються виходячи із моделей в'язко-пружного і в'язко-пластичного середовища для випадків плоскої і сферичної симетрії зарядів ВР [34, 35].

За допомогою моделі Г.М. Ляхова В.А. Плаксії вирішив задачу розповсюдження циліндричної вибухової хвилі у водонасиченому ґрунті з урахуванням в'язких властивостей середовища [36].

На практиці ведення вибухових робіт широке використання мають групові заряди, як один з методів керування полем напружень у ґрунтовому масиві. Однак механізм формування цього поля напружень, визначення кроку розташування свердловин, їхнього нахилу або плоскої симетрії накладних зарядів вивчені недостатньо.

При ущільненні структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху важливе значення набуває питання управління сейсмовибуховим імпульсом, яке може бути вирішено за рахунок підсилення конструктивних елементів будівель і споруд, методів, що дозволяють змінювати параметри вибухових хвиль при їхньому формуванні (повітряна оболонка та ін.). Також можна керувати інтенсивністю вибухових хвиль при їхньому розповсюдженні за допомогою штучної перешкоди у вигляді екрануючого прошарку із шару зруйнованих порід.

Таким чином, управління вибуховим імпульсом з метою підвищення ефективності ущільнення ґрунтів є:

- в основі існуючих методів є перерозподіл енергії в зоні низьких частот, оскільки затухання амплітудно-частотного спектру на цих частотах не таке інтенсивне, як на більш високих, а це в свою чергу призводить до більш значного ступеня ущільнення нестійкого ґрунтового масиву;
- при ущільненні значну роль відіграє швидкість прикладання навантаження та тривалість її дії, що впливають на формування напружено – деформованого стану структурно-нестійких ґрунтів у часі;
- особливого значення набуває питання керування сейсмовибуховим імпульсом у зв'язку з можливим використанням енергії вибуху поблизу до забудованих районів;
- дослідження параметрів вибухового імпульсу дозволить більш глибоко розкрити фізичну суть методів керування енергією вибуху і обґрунтувати їх область застосування.

### **1.3 Аналіз застосування малощільних вибухових речовин при ущільненні структурно-нестійких ґрунтів**

Завдяки утворенню значної енергії при вибуховому перетворенні, область застосування вибухових робіт останнім часом значно розширюється в



гірничо-будівельних технологіях при підготовці території для будівництва інженерних споруд різного призначення в м'яких і скельних ґрунтах. Вимоги виробництва в даному напрямку сприяли розвитку наукових досліджень з вдосконалення існуючих та розробці нових технологій або окремих процесів застосування енергії вибуху з метою отримання необхідних результатів при обробці просадних ґрунтових масивів.

Один із напрямків цих досліджень базувався на концепції, яка розглядала взаємодію елементів і системи на межі розподілу «продукти детонації - середовище» в просторово-часових координатах. З точки зору енергетичного показника механізм деформації ґрунтового масиву при прикладанні імпульсного навантаження є інерційним і для його реалізації необхідно дотримуватись визначених параметрів навантаження. Це можна досягти за рахунок регулювання силовою і часовою складовими вибухового імпульсу.

Досягнути значної ефективності при використанні енергії вибуху вибухових речовин (ВР) для ущільнення просадних властивостей лесових ґрунтів можна за рахунок керування вибуховим перетворенням ВР, формування оптимальних параметрів для заданих умов вибухового імпульсу на стадії детонації ВР, добором відповідних рецептур і способів ініціювання, направленням розповсюдження детонації і регулюванням його параметрів по всьому заряду, місцем розташування ВР в ґрунтовому масиві та розробці технологічних схем ущільнення ґрунтового масиву.

Розвиток досліджень з використання енергії вибуху в ґрунтовому масиві належить групі вчених Н.М. Ситому, С.В. Малащенко, І.І. Іщенко, В.П. Алексієвському під керівництвом академіка М.О. Лаврентьєва. Пізніше, при Інституті геофізики АН УССР були створені СКТБ та відділ геодинаміки вибуху, які під керівництвом О.О. Вовка займались проблемами прикладної геодинаміки, а саме:

- розробка вибухових технологій з метою отримання підземних (камуфлет них) порожнин і відкритих виїмок в м'яких породах;

- вибухові методи забезпечення стійкості просадних властивостей лесових ґрунтів за рахунок ущільнення скелету ґрунту і пониження фільтрації;
- промисловою сейсмікою та методами захисту забудованих територій від впливу вибухових робіт;
- вдосконалення існуючих рецептур ВР, засобів і методів їх підривання з метою формування оптимального поля напружень при забезпеченні екологічних вимог, та ін. [37].

Важливим етапом в розвитку динаміки ґрунтів і гірничих порід було застосування пружно-пластичної моделі С.С. Григоряна при описанні процесу розповсюдження хвиль, яка окрім рівнянь збереження маси і закону збереження кількості руху, містить ще два рівняння: перше, що враховує об'ємну стисливість середовища у вигляді залежності нормального напруження від деформації, тобто  $\sigma = \sigma(\theta)$ , яка визначається експериментальним шляхом; друге – пов'язує між собою головні напруження у вигляді умови пластичності Мізеса – Шлейхера (визначається теж експериментально) і являє собою функцію середнього нормального напруження, що характеризує інтенсивність дотичних напружень при пластичному стані твердого тіла.

Значний вагомий вклад в розвиток методів рішення задач у двовірному просторі із застосуванням кінцево-різницевого розрахункових схем внесли В.Г. Кравець, І.А. Лучко, В.А. Плаксій, Н.С. Ремез, достовірність і можливість практичного застосування яких підтверджується численними експериментами із застосуванням новітніх, унікальних методик. Розробкою спеціальних методів з прогнозування механічної дії енергії вибухового перетворення у різних середовищах при дослідженні характеру поведінки ґрунтового масиву під впливом динамічного навантаження займались В.І. Плужник, В.М. Кобасов, П.А. Паршуков, В.І. Кононенко. Значні експериментальні дослідження динамічних хвильових процесів у ґрунтах проводили В.Г. Кравець, Л.І. Демещук, І.А. Лучко, В.А. Плаксій, І.В. Белінський. Причому, при дослідженні ущільненої зони від дії вибуху, В.Г. Кравцем і

Л.І. Демещуком вперше були застосовані нетрадиційні радіоактивні методи ( $\gamma$ - $\gamma$  і нейтронного каротажу) для визначення поля напружень. Крім того, В.Г. Кравець, В.В. Захаров, Л.А. Фурман, О.О. Кузьменко, С.Н. Маркелов, при дослідженні зміни структури ґрунтового масиву в зоні впливу енергії вибуху, вперше застосували сейсмометричний метод. Отримані технологічні рекомендації на основі результатів досліджень поля деформацій навколо заряду ВР сприяли основою розробки вибухових методів ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів (О.О. Вовк, В.Г. Кравець, І.М. Літвінов, Л.І. Демещук, А.М. Рижов, І.А. Лучко, А.В. Михалюк, В.І. Плужник), влаштування протифільтраційних завіс (В.Г. Кравець, О.О. Кузьменко, В.Д. Воробйов), отримання підземних (камуфлет них) порожнин і відкритих виїмок в м'яких породах (О.О. Вовк, В.Г. Кравець, Г.І. Чорний, В.М. Глоба) та зниження фільтраційних втрат у водних магістралях (В.Г. Кравець, Ю.П. Андрєєв, Л.І. Демещук) [38 – 54].

Подальший розвиток динаміки ґрунтів на практиці призвів до виникнення сейсмічної небезпеки, причинами якої є:

- проведення вибухових робіт поблизу забудованих територій;
- одночасне підривання значної кількості ВР;
- наявність ґрунтових вод, що призводить до збільшення інтенсивності сейсмічних хвиль.

Суттєвий вклад з рішення задач промислової сейсміки виконано українськими ученими. Основні результати висвітлені в публікаціях В.В. Бойка, Ф.І. Кучерявого, В.Д. Воробйова, О.О. Вовка, О.О. Кузьменка, Ю.С. Меца, І.І. Денисюка, А. Закірова, В.Г. Кравца та інших [48, 52, 55 – 60]. На базі результатів яких сформована уява руху сейсмічних хвиль в різних середовищах, а саме: встановлено вплив конструкції циліндричного заряду на інтенсивність сейсмовибухової хвилі і закономірність її затухання на відстані; розроблена методика з визначення сейсмобезпечної відстані з урахуванням анізотропії ґрунтового масиву; розроблена методика з визначення розмірів зони незворотних деформацій ґрунтового масиву; розроблено метод

прогнозування сейсмічного впливу від ряду зарядів при проходці траншей, захисних екранів і утворення щілин поблизу забудованих територій; встановлено, що сейсмічний ефект значно вище при вибуху розосереджених зарядів, ніж при підриванні зосередженого заряду еквівалентної маси.

З метою більш ефективного застосування енергії вибуху сумішевих ВР на основі аміачної селітри в роботі [61] запропонована технологія заряджання зарядів із застосуванням поліетиленових рукавів, яка дозволила зменшити розхід ВР на 17-30 %, забезпечити рівномірність заряду по всій свердловині і стійкість від вимивання а також підвищити ефективність за рахунок різних активних добавок, які забезпечують водостійкість, стабільність та підвищують енергетику ВР.

Поряд з теоретичними та практичними дослідженнями вибухових технологій в гірничо-будівельній справі значна увага приділялась розробці нових і вдосконаленню існуючих рецептур малощільних ВР. Так, в пошуках нових засобів дроблення негабаритів на кар'єрах, відомими ученими з вибухової справи О.О. Вовком, В.Г. Кравцем, В.І. Плужником, Т.П. Кудрею, М.В. Кривцовим, Ф.М. Галаджієм на основі досліджень фізико-хімічних процесів режиму детонації вибухових складів з добавками поверхнево-активних речовин (ПАР) був розроблений новий клас пінних малощільних вибухових сумішей місцевого приготування з можливістю регулювання щільністю від 0,15 до 0,84 г/см<sup>3</sup> в залежності від технологічних вимог [61 – 66].

Для забезпечення водостійкості найпростіших ВР на основі ANFO в 1961 році Річард Еглі і Альберт Некари запропонували в якості домішки до нітрату амонію додати емульсію «масло у воді». Подальший розвиток досліджень таких малощільних ВР проводився фірмою Atlas і призвів до створення у 1969 році емульсійних вибухових речовин (ЕВР) зі значно меншим критичним діаметром і швидкістю детонації порівняно з динамітом. Основним автором першого патенту на склад і спосіб отримання ЕВР став Н.Е.Блюм. У початковому вигляді ЕВР були нечутливі до капсуля-детонатора і їх ініціювали за допомогою потужного проміжного бойовика, але з цього

моменту почалося активне вдосконалення емульсійних ВР, створення різних емульгаторів, обладнання та технологій їхнього приготування.

З аналізу видно, що на даний час ЕВР мають значні переваги порівняно з іншими класами промислових вибухових речовин, а саме: висока безпека по відношенню до механічних і теплових впливів (удару, тертя, тепла, вогню); можливість регулювання вибухових характеристик з широким діапазоном робочої щільності від 0,5 до 1,5 кг/см<sup>3</sup>; водостійкість, в результаті чого зберігаються вибухові характеристики в проточних водах на значній глибині та ін. Застосування ЕВР при проведенні підривних робіт забезпечує повну механізацію і автоматизацію виробничих процесів при приготуванні, транспортуванні і заряджанні вибухових свердловин [62].

Подальше вдосконалення існуючих рецептур малошільних водостійких ВР та керування вибуховими параметрами дозволить вдосконалити вибухову технологію ущільнення просадних лесових ґрунтів.

#### **1.4 Оцінка стану досліджуваного питання та задачі досліджень**

Необхідність ліквідації просідання всієї товщі в ґрунтових умовах II типу посприяло розробці нових ефективних методів ущільнення з використанням енергії вибуху.

Великий вклад у розвиток теоретичних і практичних знань у даній проблемі внесли відомі вітчизняні та зарубіжні науковці: В. В. Бойко, О. О. Вовк, Ю. І. Войтенко, В. В. Воробйов, Г. І. Гайко, С. В. Зайченко, Н. В. Зуєвська, В. Г. Кравець, Н. С. Ремез, М. С. Собко, О. М. Терентьев, К. Н. Ткачук, О. О. Фролов, Б. Ю. Четверик та інші.

Ущільнення просадних ґрунтів вибухами розпочато було ще у 1936 р Н. А. Філімоновим і М. М. Масловим при будівництві Верхньо-Свирської ГЕС. Однак, внаслідок недостатнього водонасичення пісків які ущільнювали утворилася велика кількість тріщин, це призвело до критичного ставлення щодо цього методу [67].

Пізніше, в 1939–1940 роках, серією глибинних вибухів були успішно ущільнені піщані ґрунти в основі земляної греблі водопадку Франклин Фолл в Нью-Гемпшире. Незабаром ефективність методу була затверджена при ущільненні гідравлічних родовищ каналу Кейп-Код у Техасі та Греблі Миндая в Нью-Йорку [68].

У 1951 році В.А. Флорін запропонував ущільнити піщану основу однієї з плотин глибинними вибухами. Рідкісне застосування методу глибинних вибухів і їх занадто короткі описи не дозволяли призначити масу зарядів, глибину їх закладання, розташування в плані і технологію проведення робіт [69].

П.Л. Івановим була розроблена методика ущільнення піску груповими зарядами і ущільнена дослідна ділянка на одному з островів Волги [70].

У 1954–1956 роках під керівництвом Г.М. Ляхова на будівництві Волзької ГЕС ім. В.І. Леніна були проведені великі польові дослідження дії вибуху в водонасичених піщаних ґрунтах. Істотним результатом роботи було детальне вивчення властивостей ударних хвиль в водонасичених пісках і вплив на ці параметри ґрунтового середовища [71].

Після опублікування в 1940 році короткої статті [68] метод ущільнення піщаних ґрунтів глибинним вибухами в США та інших зарубіжних країнах, як зазначає в історичному огляді Б. Праг, не застосовувався протягом 20 років.

На початку 1960 року спосіб ущільнення глибинними вибухами був майже одночасно використаний фірмами США в трьох віддалених один від одного районах. У жовтні 1959 року було успішно проведено випробування в штаті Флорида при ущільненні середньозернистого піску наливної дамби. Одночасно були проведені роботи по ущільненню основи греблі в районі східного Пакистану [68].

В кінці 1960 були проведені аналогічної роботи по ущільненню дрібнозернистих пісків в районі Пітсфілда Мессачузет.

Позитивні результати ущільнення незв'язаних ґрунтів вибухами дозволили приступити до вивчення можливості їх застосування для ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів. У 1964 році успішно пройшов

виробничий експеримент запропонований І.М. Литвиновим метод ущільнення попередньо замочених лесових ґрунтів глибинними вибухами [72, 17].

Пізніше в 1990 – 2000 роках були проведені роботи, які пов'язані з ущільненням насипів мостів та дамб, зокрема Греблі Джебба [73].

При цьому способі ущільнення просадних ґрунтів можна виробляти на практично будь-яку глибину (10 – 30 м і більше). Здійснюється воно шляхом попереднього регульованого замочування нагнітанням води через спеціальні дренажні поглинаючі свердловини за умови доведення ущільнюючої товщі ґрунту до граничної вологості, яка призводить його до нестійкого стану [67].

Характерним, для способу глибинного ущільнення просадних ґрунтів, є буріння вертикальних вибухових і нагнітальних свердловин із застосуванням металевих обсадних труб, що істотно ускладнює технологію проведення ущільнюючих робіт [67].

В цілях ущільнення верхньої частини просадної товщі, яка в результаті попереднього замочування залишається неуцільненою, в лабораторії інженерного ґрунтознавство САНІРІ розроблений метод ущільнення ґрунту підводними вибухами. Цей метод заснований на вибуху заряду вибухової речовини в шарі води, що покриває поверхню просадної товщі після попереднього замочування протягом 20 днів до ступеня водонасичення, що становить 0,6 – 0,8 повної вологості. Встановлено, що дія вибуху розповсюджується на глибину до 7 м, при цьому щільність ґрунту підвищується на 11 – 12%, а коефіцієнт фільтрації зменшується в 13 – 14 разів [74].

Широке використання гідровибуху при ущільнення лесових ґрунтів одержало завдяки таким показникам, як спрощена технологія, високий ступінь ущільнення ґрунту та низька вартість підготовки основи. Ущільнення ґрунту гідровибухом виконані в таких містах, як Запоріжжя, Дніпрорудне, Грозне, Волгодонське та Одеса. У місті Запоріжжя на основах виконаних гідровибухом успішно експлуатується більше ста 9 і 10 – поверхових житлових будинків [75].

Використання подовжених горизонтальних зарядів при ущільненні просадних ґрунтів застосовано також у гідромеліоративному будівництві.

Схема вибухових робіт полягає в тому, що по трасі майбутнього каналу проходиться канава заповнена водою і масив ґрунту замочується протягом 7 – 12 днів (в залежності від його властивостей). Після цього на дно канави укладається горизонтальний циліндричний заряд. Потім канава заливається водою і проводиться вибух.

Вибух зарядів проводиться ділянкою довжиною до 100 м. В залежності від форми перерізу каналу на дно його може поміститися один або два горизонтальних циліндричних заряди. Запропонований метод ліквідації просідання дозволяє значно форсувати ці роботи і одночасно скоротити терміни будівництва меліоративних споруд в ґрунтах. У зарубіжній практиці також відомі роботи щодо форсованого ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху, де спостерігається висока ефективність даної технології [68, 73].

В роботах [17, 44, 47, 72, 76] наведено технологію виконання широкого спектру допоміжних робіт: підготовка території, буріння дренажних та вибухових свердловин, замочування заряджання, контроль ущільнення та ін. В той же час приділена незначна увага таким параметрам, як: розташування сітки вибухових свердловин, величини зарядів, послідовність підривання, типу вибухових речовин та їх параметрів.

Незважаючи на очевидні переваги і певний досвід ведення робіт, вибуховий метод ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів не знайшов широкого застосування в будівельній практиці в силу ряду причин, які зводяться до наступного.

Недолік систематичних досліджень закономірностей динамічного деформування лесових ґрунтів з різними фізико-механічними характеристиками при застосуванні різних типів ВР, зумовив відсутність обґрунтованих рекомендацій щодо ефективного управління дії вибуху в ґрунті шляхом спрямованої зміни часових характеристик імпульсів тиску. Знання цих закономірностей дозволить прогнозувати розміри зони впливу вибуху,



тобто зони незворотних деформацій, приймати оптимальні параметри сітки розташування вибухових свердловин.

Беручи до уваги, що метод ущільнення просадних лесових ґрунтів за допомогою енергії вибухів застосовується на забудованих територіях, особливої важливості набуває питання управління вибуховим імпульсом з метою зниження шкідливого сейсмічного впливу на навколишні споруди. Актуальним для вирішення цієї проблеми є розроблення нових низькошвидкісних вибухових сумішей з тривалим імпульсом для забезпечення рівномірного ущільнення на необхідну потужність просадних лесових ґрунтів [67].

### **Висновки по розділу 1**

1. Фізико-хімічні способи ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів забезпечують високу міцність ґрунтів після їх застосування, однак висока вартість закріплення ґрунту, необхідність застосування спеціального обладнання, обмежена глибина обробки, відсутність надійного методу контролю обмежує широке застосування цих методів в будівельній практиці. Тому вони застосовуються, головним чином, при відновленні аварійних будівель та спорудженні відповідальних цивільних і промислових споруд.

2. Досвід підготовки основ під будівництво показує, що найбільш широке застосування отримали механічні методи ліквідації просадних властивостей ґрунтів (ущільнення важкими трамбівками і ґрунтові подушки). Низька вартість робіт і проста технологія цих методів забезпечили широке впровадження їх в будівельну практику.

Однак, при цьому, необхідно відмітити ряд негативних факторів: сезонність проведення робіт, нерівномірність ущільнення, відсутність спеціального обладнання. Значні терміни виконання робіт, придатність лише для ґрунтових умов І типу просадки.

3. Попереднє замочування забезпечує часткове ущільнення просадних ґрунтів значної потужності при низькій вартості робіт. Але тривалість підготовки основ і недоущільнення верхньої зони обмежує його застосування.

4. Ущільнення попередньо замочених ґрунтів підводним підриванням або за допомогою глибинних вибухів виключає такі фактори як сезонність і зменшує термін підготовки основ та забезпечує ущільнення просадної товщі до 30 м. і є перспективним при ліквідації просадних властивостей лесових ґрунтів. Проста технологія може забезпечити широке застосування методу глибинних вибухів в практику будівництва при подальшому вдосконаленні технології виконання вибухових робіт з врахуванням параметрів вибухових речовин.

5. Управління вибуховим імпульсом з метою підвищення ефективності ущільнення ґрунтів є:

- перерозподіл енергії в зоні менших частот, так як амплітудно-частотний спектр на цих частотах затухає не так інтенсивно, як на більш високих, то це сприяє збільшенню ущільнення ґрунтового масиву;
- урахування швидкість навантаження на ґрунтовий масив, розглядається напружено – деформований стан ґрунту у часовому просторі;
- перерозподіл схеми зарядів, для формування плоского фронту вибухових хвиль у ґрунтовому масиві.

6. Вдосконалення вибухової технології повинно бути направлено на розробку нових низькошвидкісних вибухових сумішей низької щільності з метою отримання необхідного рівномірного ущільнення по всій площі на необхідну глибину з можливістю керування сейсмічним ефектом вибуху.

## РОЗДІЛ 2

### ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЦЕПТУР ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОЩІЛЬНИХ ВР

#### 2.1 Добір компонентного складу малощільних ВР підвищеної стабільності

Виходячи з досвіду застосування енергії вибуху при ущільненні структурно-нестійких просадних ґрунтів з різними фізико-механічними характеристиками на забудованих територіях, набуває актуальності розробка нових низькошвидкісних вибухових сумішей малої щільності з метою отримання необхідного рівномірного ущільнення по всій площі на необхідну глибину та можливістю керування сейсмічним ефектом вибуху [77].

Керування впливом на структурно-нестійкі просадні ґрунти шляхом направленою зміною вибухових систем має суттєве значення в геотехнології, при видобутку корисних копалин, меліоративних роботах, будівництві та воєнній справі. Одним із рішень даної проблеми є добір і розробка нових вибухових композицій в залежності від поставлених задач, фізико-механічних характеристик ґрунтів і гідрогеологічних умов ведення вибухових робіт. Досягти даної мети можна шляхом модернізації найпростіших ВР із застосуванням різних добавок. Розглянемо основні компоненти даних ВР.

Гранульована аміачна селітра насипної щільності в паперовій оболонці детонує зі швидкістю 1300 – 1600 м/с при використанні потужного проміжного детонатора масою 0,4 – 0,8 кг тротилу. Процес детонації нестабільний, критичний діаметр детонації знаходиться в межах 0,25 – 0,30 м.

Домішки до селітри невибухових горючих компонентів, здатних підвищувати теплоту її вибуху, підвищують чутливість суміші до детонації. Причому, зі зростанням вмісту пального енергетичні характеристики і

швидкість детонації суміші зростають до досягнення стехіометричного співвідношення між окислювачем і паливом.

При доборі найбільш ефективних паливних домішок слід керуватися доступністю сировини, теплоутворюючою здатністю і щільністю речовин, а також каталітичними і сенсibiliзуючими властивостями [78, 79].

Висока щільність паливних домішок не дозволить отримати необхідну оптимальну щільність заряджання, що повинна становити  $300 - 800 \text{ кг/м}^3$  для вибухових робіт по ущільненню ґрунтів, контурного підривання, ресурсозберігаючих технологій видобутку блочного каменю і кристалічної сировини та у військовій справі.

Низька щільність окремих твердих паливних домішок дозволяє створювати малощільні сипучі ВР з підвищеною чутливістю до ініціюючого імпульсу, стабільні при транспортуванні та зберігання. При цьому найбільш перспективними є суміші на основі домішок з поверхнево-активними властивостями.

Характеристики малощільних паливних компонентів.

1. Сульфонал (ТУ 07510508). Синтетичне ПАР – суміш натрієвих солей алкілбензол-сульфакіслот, що отримують з газових фракцій ( $190 - 260^\circ\text{C}$ ) нафти: зовнішній вигляд – порошок світло-жовтого кольору; насипна щільність –  $120 - 160 \text{ кг/м}^3$ ; вміст основної речовини – не менше 75 %; загальний вміст сульфату і сульфїту натрію – не більше 20 %; вміст води – не більше 3 %; рН 1 % -го водного розчину – 7,0 – 8,5; токсичність – не токсичний.

2. Вугільний порошок (ТУ 12-01-81): крупність –  $0 - 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; вміст горючих речовин – не менше 80%; вміст води – не більше 7 %; токсичність – не токсичний.

3. Полістирол (пінополістирол) по ТУ 2214-126-05766801-2003. Полістирол - лінійний полімер стиролу з початковою щільністю  $1050 - 1100 \text{ кг/м}^3$  (марки ПСБ, АСВ): зовнішній вигляд - склоподібні безбарвні гранули; вміст летючих речовин – не більше 12 %; вміст пароутворювача – не

більше 4 %; насипна щільність спіненого продукту – 150 – 200 кг/м<sup>3</sup>; температура спінювання – 85 – 100°C; пожежонебезпека - пожежонебезпечний; температура самозаймання – 440°C; теплотворна здатність – 460,9 10<sup>5</sup> Дж/кг; коефіцієнт спінювання 15 – 24; токсичність – не токсичний.

Спінювання полістиролу виконують шляхом термічної обробки гранул полімеру при температурі 100 – 120 °C в киплячій воді або паровій ванні. При цьому спінююча добавка розширюється і спучує гранули.

У порівнянні з спінюванням у воді, обробка полістиролу парою призводить до зменшення діаметра пор на 5 – 10 % і зниженням більш ніж в 2 рази вмісту ізопентану при всіх значеннях коефіцієнта спінювання. Втрати ізопентану, активного в процесах вибухового перетворення, в залежності від вмісту цієї речовини в початковому продукті і коефіцієнта спінювання, становить 10 – 30 %.

4. Аміачна селітра (ДСТУ 7370:2013): сумарна масова частка азотнокислого амонію – не менше 98 %; масова частка вологи – не більше 0,8 %; масова частка добавок антизлежування (нітратів кальцію і магнію) – 0,2 – 0,5 %; крупність подрібненого продукту – 0 – 0,2 · 10<sup>-3</sup> м.

5. Аміачна селітра водостійка (ГОСТ 14702-79) марок ЖВК і ЖВГ: масова частка азотнокислого амонію – не менше 9 %; масова частка вологи – не більше 0,8 %; масова частка суміші жирних кислот з парафіном – 0,3 – 0,4 %; водостійкість за гідродинамічним приладом – не менше 2451 Па.

Ця селітра використовується тільки для ВР, що застосовуються в мокрих вибоях і зарядних порожнинах в льодистих породах [80].

Подрібнення селітри можна виконувати в кульових, дискових та струменевих млинах.

Технологія приготування малощільних ВР з порошкоподібними паливними домішками полягає в змішуванні подрібненої аміачної селітри з горючими компонентами в барабанних змішувачах або, при малих об'ємах, вручну з отриманням однорідного продукту [81].

Компонентний склад і характеристики малоощільних ВР, розроблених у відділі прикладної геодинаміки вибуху та вдосконалена ВР (АС/СФ/АП), наведені в таблиці 2.1 та 2.2. Для порівняння показані характеристики стандартного ігданіту АС/ДТ.

Таблиця 2.1 – Компонентний склад малоощільних ВР

№ п/п	Компоненти ВР	Склад компонентів, вага %			
		Ігданіт	Малоощільна ВР АС/СФ/ВП	Малоощільна ВР АС/СФ/ППС	Малоощільна ВР АС/СФ/АП
1	Аміачна селітра	94,5	87	87	90
2	Дизельне паливо	5,5	—	—	—
3	Сульфонал – порошок	—	3	3	6
4	Вугільний пил	—	10	—	—
5	Пінополістирол	—	—	10	—
6	Алюмінієва пудра	—	—	—	4

Розроблені та вдосконалені (АС/СФ/АП) рецептури безтротилових ВР на основі аміачної селітри (АС) і розчину поверхнево-активної речовини (ПАР), повинні працювати в детонаційному режимі та мати властивості ВР і бути чутливими до ініціюючого імпульсу від ДШ, капсуля-детонатора та ін.

Таблиця 2.2 – Характеристики малоощільних ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР			
			Ігданіт	Малоощільна ВР АС/СФ/ВП	Малоощільна ВР АС/СФ/ППС	Малоощільна ВР АС/СФ/АП
1	Щільність	кг/м <sup>3</sup>	900-1000	600-800	300-400	600-800
2	Критичний діаметр - відкритого заряду - в жорсткій оболонці	10 <sup>-3</sup> м	160-180 120-140	50-80 30-40	50-70 30-40	50-70 30-40
3	Теплота вибуху	10 <sup>3</sup> Дж/кг	3765-3850	3670-3830	3600-3800	3680-3840
4	Мінімальний ініціюючий імпульс - відкритого заряду - в жорсткій оболонці	кг ТНТ	0,4-1 0,4	0,01-0,02 ЕД-8	0,01-0,02 ЕД-8	0,01-0,02 ЕД-8
5	Фізична стабільність в інтервалі температур	°С	+30 – -40	+40 – -50	+40 – -50	+40 – -50
6	Льодостійкість (втрата ваги при витримці в мекеті льодової свердловини) - через 2 години - через 4 години	%	2-5 10-15	0,7-1,0 1,2-1,6	1,0-1,3 1,4-1,8	0,8-1,1 1,3-1,7

Для перевірки цієї суміші щодо спроможності забезпечення ущільнення структурно-нестійких ґрунтів, було проведено розрахунок об'єму та тиску безтритилових ВР в режимі детонації основних компонентів суміші. Питомий об'єм газів, який буде утворюватися при детонації 1 кг суміші (нітрат амонію ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) та поверхнево-активного розчину), приведений до нормальних умов (температура  $0^\circ\text{C}$ , тиск 133,3 Па), можна отримати за формулою:

$$V = \frac{22,4 \cdot (n_1 + n_2 + \dots n_n) \cdot 1000}{NM} \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.1)$$

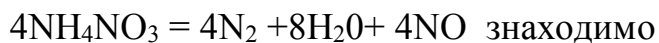
де  $n_1 + n_2 + \dots n_n$  – число газоутворених грам-молекул у продуктах горіння;  
 $N$  – число грам-молекул продукту, який бере участь в реакції;  
 $M$  – молекулярна маса продукту горіння.

Найбільш широко у промисловості та гірничій справі застосовуються суміші аміачної селітри з різними видами вуглеводневих горючих матеріалів, інших вибухових речовин, а також багатокomпонентні суміші, а саме: склади типу аміачна селітра/дизельне паливо (АС/ДТ); рідка суміш аміачна селітра/гідразін; водонаповненні промислові вибухові речовини (акванал, акваніт та інші); суміші з іншими вибуховими речовинами (амоніт, детоніт та інші); суміш з алюмінієвою пудрою (амонал).

Залежно від призначення аміачну селітру випускають двох марок: А та Б. А – для промисловості, Б – для сільського господарства. Допускається застосування селітри марки Б для промисловості. Для зменшення гігроскопічності та злежуваності у марку Б вводять різні кондиціонуючі домішки (доломітну, сульфатну або магнеєву).

Хімічна формула аміачної селітри:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , щільність 1,725 г/см<sup>3</sup>, температура плавлення –  $169,6^\circ\text{C}$ , температура кипіння –  $235^\circ\text{C}$ , температура розкладання –  $210^\circ\text{C}$ .

За реакцією хімічного розкладу нітрату амонію.



$$V = \frac{22,4(112 + 154 + 60) \cdot 1000}{320} = 228,29 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Тиск газів суміші в полімерному циліндричному корпусі, запаяний з обох боків, в режимі детонації визначається за формулою:

$$P = \frac{98P_oVT_k\Delta}{273(1 - 0,001V\Delta)} \text{ кПа}, \quad (2.2)$$

де  $P_o$  – атмосферний тиск газів при горінні приймається  $1,03 \text{ кгс/см}^2$ ;

$V$  – питомий об'єм газів, л/кг;  $T_k$  – абсолютна температура газів горіння в градусах Кельвіна;  $\Delta$  – щільність суміші, кг/дм<sup>3</sup>.

$$P = \frac{98 \times 1,03 \times 228,29 \times 273 \times 1,725}{273(1 - 0,001 \times 228,29 \times 1,725)} = 64113,23 \text{ кПа}.$$

Визначимо відсоток дизельного пального в аміачній селітрі для одержання суміші з нульовим кисневим балансом.

Знаходимо значення кисневого балансу (КБ), який для аміачної селітри позитивний і становить  $KB_1 = +20 \%$ , для дизельного пального – негативний і становить  $KB_2 = -318 \%$ .

Кількість вагових частин аміачної селітри, яка потрібна для повного окислювання однієї частини дизельного пального, визначається за формулою:

$$M = (-KB_2) / (+KB_1) = (-318) / (+20) = -15,9 \quad (2.3)$$

Таким чином, одна вагова частина дизельного пального потребує 15,9 частин аміачної селітри.

Вміст компонентів у складі суміші визначається за формулою [70]:

$$P_1 = \frac{KB_2}{KB_1 - KB_2} \quad P_2 = \frac{KB_1}{KB_1 - KB_2}, \text{ або } P_2 = 1 - P_1 \quad (2.4)$$

Значення КБ першого та другого компонентів підставляються у формулу (2.4) з відповідними знаками (плюс або мінус).

Для ігданіту, який складається із аміачної селітри та дизельного пального, використовуючи формулу (2.4), отримаємо:

$$P_2 = \frac{+20\%}{+20\% - (-318\%)} = \frac{20\%}{338\%} = 0,06; \quad P_1 = 1 - P_2 = 0,94$$



Таким чином, КБ такої суміші буде нульовим за умов, що в ній буде 94 % аміачної селітри та 6 % дизельного пального.

Кисневий баланс вибухових сумішей, що складаються з кількох речовин, визначається за формулою:

$$KB_{\Sigma} = KB_1 \cdot P_1 + KB_2 \cdot P_2 + \dots + KB_i \cdot P_i, \quad (2.5)$$

де  $KB_i$  - кисневий баланс кожного компонента вибухової суміші, %;  $P_i$  - вміст відповідного компонента в суміші в частках одиниці.

Малоцільна ВР на основі АС/СФ/АП складається з аміачної селітри з кисневим балансом  $KB_1 = +20$  %, сульфоналу ( $C_{16-19}H_{29-35}SO_3Na$ ) з кисневим балансом  $KB_2 = -230$  % та алюмінієвої пудри (АІ) з кисневим балансом  $KB_3 = -89$  %. Підставляючи дані у формулу (2.5), отримаємо КБ для даної рецептури:

$$KB_{\Sigma} = (+20\%) \cdot 0,90 + (-230\%) \cdot 0,06 + (-89\%) \cdot 0,04 = 0,6$$

Із розрахунку видно, що запропонована рецептура має практично нульовий кисневий баланс.

З наведених даних видно, що щільність малоцільних композицій регулюється в діапазоні 300 – 800 кг/м<sup>3</sup>, критичний діаметр зарядів цих ВР в жорсткій оболонці становить 30 – 40 10<sup>-3</sup> м, в той час, як у ігданіта критичний діаметр становить 120 – 140 10<sup>-3</sup> м. Мінімальний ініціюючий імпульс відкритого заряду малоцільних сумішей становить 0,01 – 0,02 кг ТНТ; заряди в жорсткій оболонці чутливі до детонатора ЕД-8.

Помітного підвищення чутливості малоцільних вибухових сумішей до ініціюючого імпульсу вдалося досягти за рахунок застосування домішок на основі натрієвих солей алкілбензолсульфакіслот, які володіють каталітичними властивостями. При цьому це практично не підвищило чутливість ВР до механічних впливів (удару, тертя, іскри, променю вогню). Тому розроблені вибухові суміші безпечні при виготовленні та застосуванні.

Висока фізична стабільність сипучих малоцільних ВР забезпечує збереження вибухових характеристик цих сумішей не менше 1 міс в діапазоні температур від + 30 °С до – 40 °С.

Рівень льодостійкості малощільних ВР дозволяє застосовувати їх в свердловинах, пробурених в льодистих породах, при знаходженні заряду у вибої близько 12 год. Застосування в якості окислювача водостійкої селітри марок ЖВК або ЖВГ забезпечує повну льодостійкість такого типу ВР.

Носійна здатність зарядів сипучих малощільних ВР досить висока, що дозволяє використовувати їх при ущільненні ґрунтів в плоских зарядах з піщаною забивкою.

Традиційно водонаповнені спінені вибухові композиції складаються з аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води [82].

Піноутворювачі є поверхнево-активними речовинами першого класу на основі низькомолекулярних з'єднань дифільного характеру, що мають гідрофільну частину (одну або кілька полярних груп, наприклад -ОН, -COOH, -SO<sub>3</sub>H, -OSO<sub>3</sub>H, COOMe, N<sup>+</sup>(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>J<sup>-</sup>, -NH<sub>2</sub>) і гідрофобний аліфатичний ланцюг, іноді включає ароматичну групу.

За хімічними властивостями ПАР поділяються на аніоноактивні (наприклад, солі карбонових кислот, алкілсульфати, алкілсульфонати), катіоноактивні (наприклад, четвертинні амонієві основи, солі амінів) і неіоногенні (спирти, ефіри і т.д.).

ПАР це багатоатомні органічні молекули, тому головним є питання про взаємозв'язок між будовою молекул і їх поверхнево-активними властивостями. Згідно з правилом Траубе, при збільшенні числа атомів вуглецю в алкільному ланцюгу поверхнева активність зростає в 3,2 на кожную групу = CH<sub>2</sub>. Причини, що обумовлюють таку поведінку ПАР, пояснюються тим, що поверхнева активність визначається роботою адсорбції, тобто збереженням енергії від переходу молекули ПАР з об'єму фази на поверхню, яка на одну метиленову групу становить 3 кДж/моль. Звідси ряд дослідників роблять висновки, що кожна група =CH<sub>2</sub> розташована по відношенню до поверхні так само, як будь-яка інша група в ланцюзі, а це може бути тільки при горизонтальному розташуванні [83].

ПАР першого класу відносять до колоїдних або міцелярнорозчинних, другого класу – до неколоїдних або молекулярнорозчинних. Перше застосування ПАР першого класу знайшли місце в якості миючих засобів, емульгаторів і піноутворювачів. Неколоїдні ПАР застосовують як емульгатори або стабілізатори ПАР.

Тому більшість практично важливих промислових емульгаторів і піноутворювачів є складні суміші поверхнево-активних речовин. В результаті на межі розподілу емульсій або піни відбувається адсорбція відразу кілька речовин. Однак процес адсорбції навіть двох ПАР вивчений недостатньо, що суттєво ускладнює завдання отримання стабільної піни.

Піна – висококонцентрована гетерогенна система газ-рідина, в якій бульбашки газу розділені тонкими плоскими прошарками рідини, що утворюють замкнуту решітку. Від висококонцентрованої емульсії піни відрізняються тим, що рідина дисперсної фази замінена газом.

Принципово причини стійкості піни ті ж самі, що й у висококонцентрованих емульсій, однак наявність плоских плівок додає ряд особливостей у багатьох властивостях пін.

На відміну від емульсій, які в ряді випадків стійкі протягом багатьох днів піни, за невеликим винятком (тверді піни), стійкі лише протягом декількох годин [84].

Значно менша стійкість піни в порівнянні з емульсіями, обумовлена тим, що плівки піни маючи мікронну товщину дуже легко піддаються до зовнішніх впливів (випаровування і т.п.). Лише в умовах герметизації в зарядній порожнині піни наближаються по стійкості до висококонцентрованих емульсій, стабілізованими тими ж ПАР, в яких плівки неперервної фази захищені від випаровування та інших впливів рідиною дисперсної фази.

У нашому випадку, коли рідка фаза представлена у вигляді суспензії селітри з водою, піносуспензія більш стійка, так як рідина дисперсної фази випаровується, а піна залишається у вигляді твердого каркаса частинок селітри, зцементованих ПАР.

Характеристики піноутворювачів [85].

1. Сульфосолі – контакт чорний нейтралізований, рафінований (КЧНР), ТУ 38-3022-80. Дана ПАР є продуктом нейтралізації содою або їдким натрієм кислого гудрону – відходу виробництва рафінованого від масел і смол, одержуваного сульфуванням контактним газом ( $\text{SO}_3$ ) прямої перегонки або гідроочищених гасо-газойльових фракцій нафти або легкого газойлю каталітичного крекінгу.

- 1) Зовнішній вигляд – малов'язка темна рідина
- 2) рН продукту – 7 – 10
- 3) Масова частка сульфосолей – 40 – 45 %
- 4) Масова частка несульфатних речовин (смол і масел) – не більше 1 %
- 5) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 6) Токсичність – не токсичний

2. Рафінований алкіларілсульфонат марки ДС-РАС (ТУ 38-10764-75). Ця ПАР створена на основі сульфокислот гасових фракцій і являє собою натрові солі нафтових сульфокислот.

- 1) Зовнішній вигляд – однорідна прозора рідина
- 2) Розчинність у воді – повна
- 3) Вміст несульфатних речовин – не більше 1 %
- 4) Вміст основної речовини – не менше 45 %
- 5) Вміст соди – не більше 3 %
- 6) Пожежонебезпека – пожежобезпечний
- 7) Токсичність – не токсичний

3. Алкілсульфати натрію (СТП 13-1-78). Цю ПАР отримують при сульфатуванні олеумом синтетичних жирних первинних спиртів фр.  $\text{C}_{10}$ - $\text{C}_{18}$  або вторинних немильних спиртів, з наступною нейтралізацією кислих сульфоефірів їдким натром.

- 1) Зовнішній вигляд – паста світло-жовтого кольору
- 2) Вміст основної речовини – не менше 25 %
- 3) Вміст несульфатних з'єднань – не менше 12 %

4) Пожежонебезпека – пожежобезпечний

5) Токсичність – не токсичний

4. Алкілсульфати натрію - миючий «Прогрес» (ТУ 10 719-707). ПАР марки «Прогрес» (натрієві солі вторинних алкілсульфатів) отримують шляхом сульфатування суміші технічних фракцій олефінових вуглеводнів нормальної будови з наступною нейтралізацією і очищенням .

1) Зовнішній вигляд – однорідна рідина

2) Вміст основної речовини – не менше 30 %

3) Вміст несультатних вуглеводнів по відношенню до активної речовини – не більше 1 %

4) рН продукту – 7,5 – 8,5

5) Пожежонебезпека – пожежобезпечний

6) Токсичність – не токсичний

Компонентний склад і характеристики спінених пастоподібних ВР наведені в таблиці 3.3. Як видно з приведених даних, щільність вибухових композицій за рахунок аерації суміші може регулюватись в межах від 200 до 800 кг/м<sup>3</sup>, критичний діаметр зарядів ВР в жорсткій оболонці становить  $(30 - 40) \cdot 10^{-3}$  м. Заряди в жорсткій оболонці чутливі до детонатора ЕД-8.

Фізична стабільність аерованої системи в діапазоні температур від +30 до -10°C у відкритій посудині становить 9 – 24 год, в закритій посудині становить порядку 5 – 8 діб. При зниженні температури до -15°C стабільність ВР різко падає за рахунок замерзання оболонок пінокомірок і руйнування піни.

Льодостійкість спінених ВР низька, так як піноспензія розчиняє лід, обводнюється і втрачає стабільність.

Таблиця 2.3 – Компонентний склад і характеристики спінених пастоподібних ВР

№ п/п	Компоненти ВР	Вміст компонентів, мас. %				
		Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V
1	Аміачна селітра	92,0-93,3	89,8-92,9	86,5-88,5	90,5-91,5	83,5-84,5
2	Сульфосолі - контакт чорний нейтралізований, рафінований	2,0-4,0	2,0-4,0	–	–	–
3	Рафінований алкіларілсульфонат	1,5-3,5	–	5,0-7,0	5,0-7,0	5,0-7,0
4	Етилендіамін	0,2-0,5	–	–	–	–
5	Алкілсульфати натрію	–	1,0-3,0	–	–	–
6	Контакт Петрова	–	–	1,0-3,0	–	1,0-3,0
7	Карбоксиметилцелюлоза	–	–	0,5-1,5	–	0,5-1,5
8	Алкілсульфати натрію (вторичн.)	–	–	–	1,0-3,0	–
9	Поліакриламід	–	–	–	0,5-1,5	–
10	Вода	1,0-2,0	2,0-5,0	3,0-4,0	–	3,0-4,0
11	Алюмінієва пудра	–	–	–	–	3,0-4,0
Характеристики						
1	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	500-800	500-800	200-350	200-250	300-650
2	Кратність піни	1,8-3,0	1,8-3,0	3,6-4,0	3,6-4,2	3,6-4,0
3	Критичний діаметр, 10 <sup>-3</sup> м - відкритого заряду	50-70	50-80	50-70	60-90	50-70
	- в жорсткій оболонці	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
4	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C: – у відкритій посудині, год.	9-10	10-12	14-17	20-24	15-18
	– у закритій посудині, діб	5-7	6-7	5-8	–	6-8
5	Теплота вибуху, 10 <sup>3</sup> Дж/кг	3500-3770	3520-3780	3500-3700	3500-3700	3530-3750
6	Мінімальний ініціюючий імпульс - відкритого заряду, кг ТНТ	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,03	0,01-0,02	0,01-0,03
	- в жорсткій оболонці	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8	ЕД-8
7	Льодостійкість	не льодостійкі				

## 2.2 Формування вибухових характеристик вдосконалених малошільних ВР

Динамічні характеристики малошільних сипучих ВР досліджувалися на вибуховому полігоні НАН України в порівнянні з характеристиками штатного ВР – амоніту № 6ЖВ і стандартного ігданіту АС/ДТ. При цьому досліджувалась детонація відкритих зарядів ігданіту діаметром  $(160 - 180) \cdot 10^{-3}$  м, малошільних ВР і амоніту – діаметром  $(50 - 60) \cdot 10^{-3}$  м. У жорсткій оболонці діаметр зарядів ігданіту становить  $140 \cdot 10^{-3}$  м, малошільних ВР і амоніту –  $(30 - 40) \cdot 10^{-3}$  м. Бризантність зарядів визначалась згідно ДСТУ EN 13631-1:2008 «Вибухові речовини для цивільного застосування. Бризантні вибухові речовини. Частина 1. Вимоги» [86].

Час наростання тиску в імпульсі та тиску на фронті ударної хвилі визначався експериментальним шляхом за стандартними методиками, швидкість наростання тиску до максимуму – за розрахунком.

Динамічні характеристики сипких вибухових сумішей наведені в таблиці 3.4. Як видно з приведених даних, на відміну від амоніту № 6 ЖВ і ігданіту, мінімальна швидкість детонації малошільних ВР у відкритих зарядах становить  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м/с, а в зарядах в жорсткій оболонці –  $(1,4 - 1,6) \cdot 10^{-3}$  м/с. Розходження значень швидкості детонації в малошільних сумішах становить 30 – 35%, це свідчить про пульсуючий режим детонації цих ВР.

Встановлена бризантність малошільних ВР, становить  $(5 - 11) \cdot 10^{-3}$  м, в той час, як у ігданіту вона становить  $(15 - 20) \cdot 10^{-3}$  м, а штатного амоніту –  $(24 - 29) \cdot 10^{-3}$  м.

Тривалість зростання тиску в імпульсі до максимуму у малошільних ВР знаходиться в межах  $(43 - 60) \cdot 10^{-6}$  с, у ігданіту  $(30 - 40) \cdot 10^{-6}$  с, у бризантного амоніту –  $(4 - 5) \cdot 10^{-6}$  с. Тиск на фронті хвилі у малошільних сумішей знаходиться в межах  $(0,5 - 0,95) \cdot 10^9$  Па, а у амоніту тиск істотно більше і досягає  $(5,5 - 6,1) \cdot 10^9$  Па.

Таблиця 2.4 – Динамічні характеристики сумішевих ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР				
			Амоніт №6ЖВ	Ігданіт АС/ДТ	Малощільна ВР АС/СФ/ВП	Малощільна ВР АС/СФ/ППС	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Швидкість детонації: відкритий заряд	$10^3 \text{ м/с}$	3,2-3,7	2,4-2,6	1,4-2,0	1,0-1,5	1,5-2,1
	заряд в жорсткій оболонці		3,5-4,8	2,7-3,0	1,6-2,4	1,4-2,1	1,6-2,5
2	Бризантність ВР	$10^{-3} \text{ м}$	24-29	15-20	8-10	5-7	9-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	$10^{-6} \text{ с}$	4-5	30-40	45-50	55-60	43-48
4	Тиск на фронті хвилі	$10^9 \text{ Па}$	5,5-6,1	2,0-2,5	0,8-0,9	0,5-0,6	0,85-0,95
5	Швидкість зростання тиску	$10^{14} \text{ Па/с}$	11-15	0,5-0,8	0,16-0,20	0,08-0,11	0,18-0,22

Швидкість зростання тиску в імпульсі у малощільних ВР становить  $(0,08 - 0,22) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$ , проти  $(11 - 15) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$  у амоніту № 6ЖВ.

Висока пористість малощільних сумішей обумовлює режим повільного вибухового перетворення цих сумішей, що забезпечує ефективність їх використання на окремих видах вибухових робіт, зокрема, при роботі вибуху на викидання і ущільнення нестійких просадних ґрунтів.

Динамічні характеристики спінених сумішей досліджувалися в порівнянні з малощільними ВР на основі АС/СФ/ППС. При цьому вивчалася детонація відкритих зарядів діаметром  $(50 - 90) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Бризантність зарядів вивчалася за ГОСТ 5984-80. У всіх випадках досліджувались свіжоприготовлені спінені суміші, так як піносистеми змінюють свої характеристики в часі.

Динамічні характеристики спінених ВР наведені в таблиці 2.5. З наведених даних видно, що швидкість детонації відкритих зарядів ВР становить  $(1,0 - 2,5) \cdot 10^3 \text{ м/с}$ , малощільної сипучої ВР на основі АС/СФ/ППС  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^3 \text{ м/с}$ . Відповідно, бризантність спінених сумішей трохи вище, ніж сипучих –  $(7 - 11) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  проти  $(5 - 8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .



Таблиця 2.5 – Динамічні характеристики спінених ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР					Малоцільна ВР АС/СФ/ППС
			Суміш І	Суміш ІІ	Суміш ІІІ	Суміш ІV	Суміш V	
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	$10^3 \text{ м/с}$	1,0-2,4	1,0-2,5	–	–	1,0-2,2	1,0-1,5
	- заряд в жорсткій оболонці		1,1-3,2	1,1-3,0	1,9-2,1	2,0-2,2	2,1-2,3	1,4-2,1
2	Бризантність в сталюму кільці	$10^{-3} \text{ м}$	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11	5-8
3	Час зростання тиску в імпульсі	$10^{-6} \text{ с}$	40-50	45-50	50-55	50-60	55-60	55-60
4	Тиск на фронті хвилі	$10^9 \text{ Па}$	0,7-0,8	0,7-0,8	0,6-0,7	0,5-0,7	0,6-0,8	0,5-0,6
5	Швидкість зростання тиску	$10^{14} \text{ Па/с}$	0,14-0,20	0,14-0,17	0,11-0,14	0,08-0,14	0,12-0,16	0,08-0,11

Тривалість зростання тиску в імпульсі до максимуму у досліджених вибухових композиціях близька і складає  $(40-60) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Тиск на фронті хвилі у спінених ВР на  $(0,1-0,2) \cdot 10^9 \text{ Па}$  вище, ніж у сипучих малоцільних ВР.

Швидкість зростання тиску в імпульсі у спінених ВР становить  $(0,08 - 0,20) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$ , у сипучих сумішей -  $(0,08 - 0,11) \cdot 10^{14} \text{ Па/с}$ .

Дослідження динамічних характеристик спінених ВР змінної щільності показує, що описані спінені вибухові композиції можуть ефективно використовуватися для рівномірного ущільнення просадних лесових ґрунтів на необхідну потужність та при розмінуванні мінних полів.

## Висновки по розділу 2

1. Встановлено добір компонентного складу малоцільних вибухових сумішей місцевого приготування на основі порошкоподібних і рідких ПАР, які відрізняються високою фізичною стабільністю в інтервалі температур від  $+30$  до  $-40^\circ\text{C}$ . Стабільність спінених ВР при негативних температурах в закритому об'ємі не перевищує 5 – 8 діб.

2. Досліджено динамічні характеристики малощільних вибухових сумішей (щільністю від 200 до 800 кг/м<sup>3</sup>). Встановлено, що мінімальна швидкість детонації цих ВР у відкритих зарядах становить  $(1,0 - 1,5) \cdot 10^3$  м/с, а в зарядах в жорсткій оболонці -  $(1,4 - 1,6) \cdot 10^3$  м/с, в той час, як у штатного амоніту №6ЖВ -  $(3,2 - 3,5) \cdot 10^3$  м/с.

3. Бризантність малощільних ВР не перевищує  $(10 - 11) \cdot 10^{-3}$  м, коли у ігданіта вона становить  $(15 - 20) \cdot 10^{-3}$  м, а у амоніта №6ЖВ -  $(24 - 29) \cdot 10^{-3}$  м.

4. Тривалість зростання тиску в імпульсі до максимуму у малощільних ВР досягає  $(43 - 60) \cdot 10^{-6}$  с, відповідно у ігданіта -  $(30 - 40) \cdot 10^{-6}$  с та у амоніта №6ЖВ -  $(4 - 5) \cdot 10^{-6}$  с.

5. Тиск на фронті хвилі у малощільних сумішевих ВР не перевищує  $(0,5 - 0,95) \cdot 10^9$  Па, в той час, як у амоніта №6ЖВ воно досягає до  $(5,5 - 6,1) \cdot 10^9$  Па.

6. Швидкість зростання тиску в імпульсі у малощільних ВР становить  $(0,08 - 0,22) \cdot 10^{14}$  Па/с, проти  $(11 - 15) \cdot 10^{14}$  Па/с у амоніта №6 ЖВ.

### РОЗДІЛ 3

## ВПЛИВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 3.1 Вплив ультразвукового випромінювання на зовнішню та внутрішню структури гранул аміачної селітри

Мікроскопічні дослідження зовнішньої та внутрішньої структури сколу гранул (частинок) аміачної селітри, як обробленої ультразвуковим випромінюванням, так і без, виконано в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля за допомогою мікроскопу типу Ломо Метам Р-1, оснащеного CCD відеокамерою «DigitalKOCOM», які дозволяють виводити дані дослідних зразків на дисплей комп'ютеру зі збільшенням у 176, 360 та 900 разів (рисунок 3.1) [87].

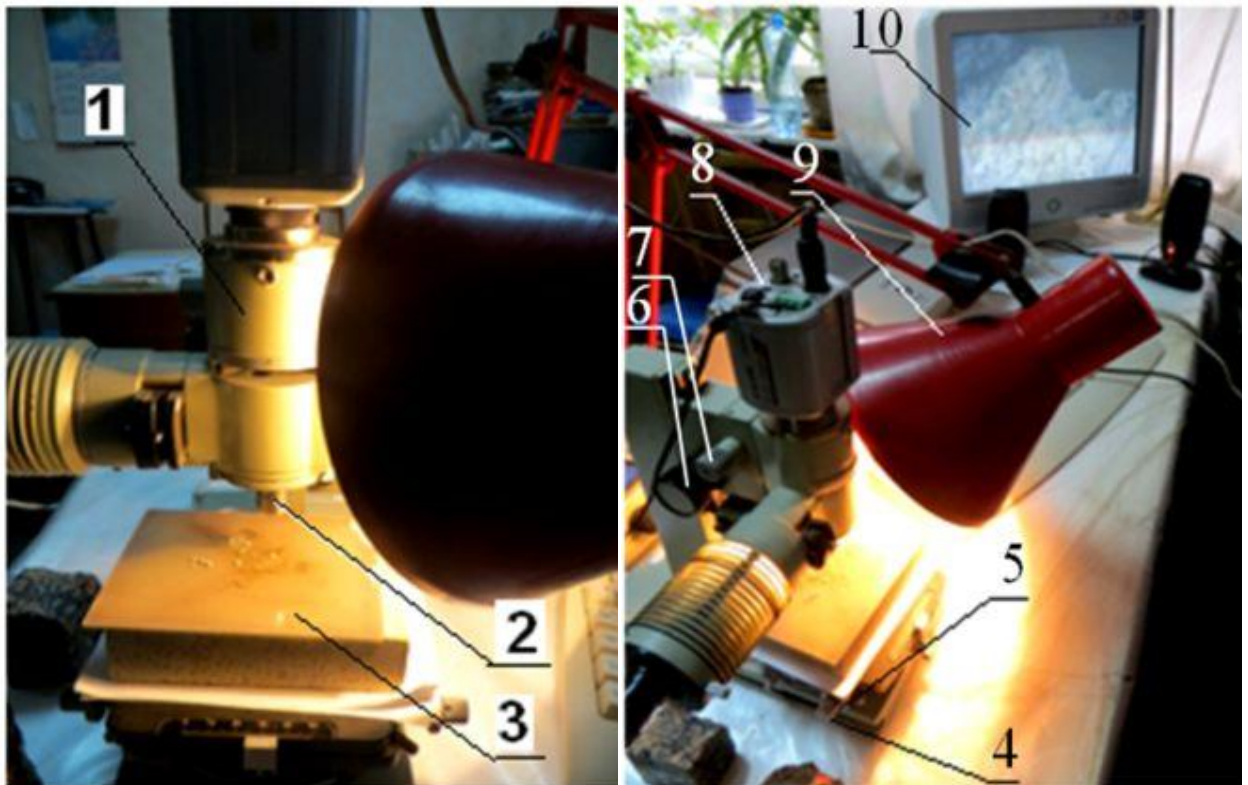


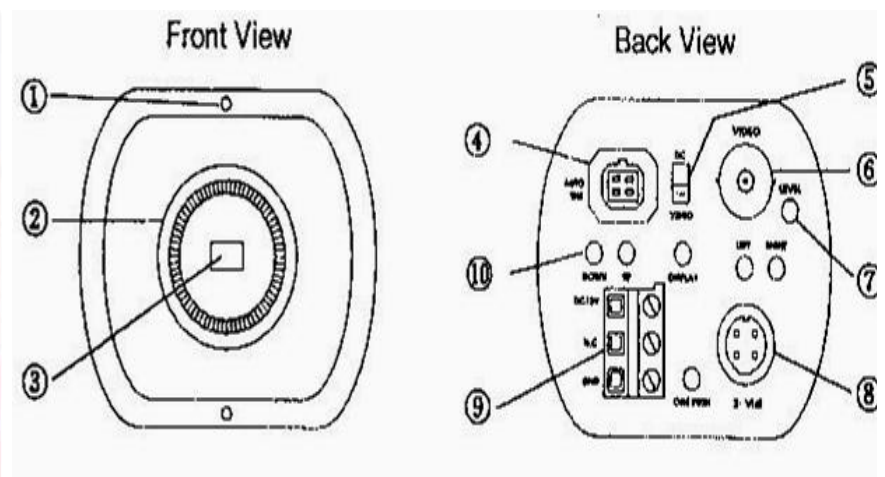
Рисунок 3.1 – Загальний вигляд мікроскопа Ломо Метам Р-1

Мікроскоп Ломо Метам Р-1 оснащений CCD відеокамерою DigitalKOCOM, підключений до комп'ютера і складається з: 1 – мікроскоп, 2 – об'єктив, 3 – площадка для розміщення дослідних зразків, 4 – гвинт для переміщення площадки по горизонтальній осі, 5 – гвинт для переміщення площадки по вертикальній осі, тобто для переміщення об'єктива навколо своєї осі, 6 – гвинт для грубого переміщення площадки мікроскопу по вертикальній осі, 7 – гвинт для тонкого переміщення площадки мікроскопу по вертикальній осі, 8 – камера, 9 – лампа, яка необхідна для освітлення дослідного зразка, 10 – дисплей комп'ютера.

Принцип роботи мікроскопу наступний: при обертанні гвинта 6 відбувається налаштування зображення у мікроскопі 1, тонке налаштування зображення – за допомогою гвинта 7, ціна поділки якого становить 2 мкм, тобто при повному його оберті на  $360^\circ$  відбувається переміщення об'єктива мікроскопу 2 на 100 мкм вгору або вниз, відносно площадки 3. За допомогою відеокамери 8, зі збільшенням освітленості завдяки лампі 9, відбувається відтворення зображення на дисплеї комп'ютера 10. Загальний вид відеокамери представлено на рисуюнок 3.2 [88].



а



б

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд CCD відеокамери DigitalKOCOM:  
а – вид зверху; б – схема

CCD відеокамера DigitalKOCOM складається з: 1 – гвинт, що фіксує тримач для лінзи, фіксація C/CS кріплення тримача для лінзи і запобігання втрати фокуса; 2 – тримач для лінзи, може змінювати утримання C і CS кріплення разом з лінзою; 3 – блок зображення. Зображення ретранслюється до цього блоку через лінзи, при наявності CCD і оптичного фільтра можна завдяки цьому блоку уникнути забруднення та відбитків пальців, що може погіршувати якість зображення; 4 – роз'єм з автоматичною діафрагмою – підключення кабелю до автоматичної діафрагми; 5 – перемикач автоматичної діафрагми – дає можливість вибрати перемикач в залежності від типу лінз (вгору – робота з DC, вниз – робота з відео); 6 – відео-вихідний роз'єм – підключення кабелю до відеовиходу; 7 – рівень регулювання; 8 – роз'єм виходу – підключення до комп'ютеру; 9 – вхід напруги – DC+12V, 300 mA.

Тіло гранул аміачної селітри (нітрат амонію)  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  являє собою полікристалічну структуру білого кольору, яка вміщує в собі 60 % кисню, 35 % азоту і 5 % гідрогену [89, 90].

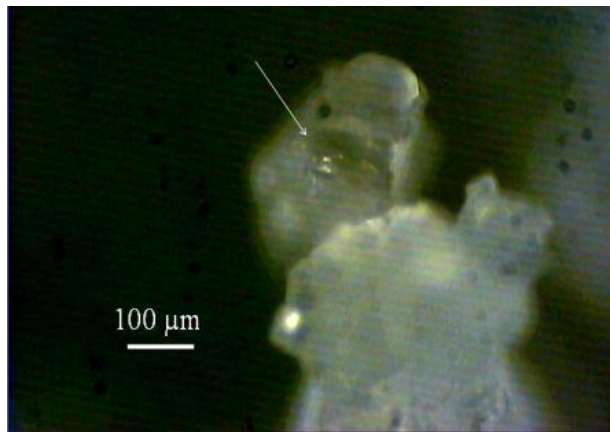
Структура сколу гранул АС досліджувалась з глибиною проникнення 40 мкм (рисунок 3.3) і 60 мкм (рисунок 3.4) без обробки ультразвукового випромінювання. Крім того показано поверхню фрагменту уламків аміачної селітри (рисунок 3.3 в і 3.4 б).

Зображення сколу гранули аміачної селітри після ультразвукової обробки наведено на рисунку 3.5, а на рисунку 3.6 гранули аміачної селітри змащені індустріальною оливою. Ультразвуком оброблялись як звичайні гранули аміачної селітри так і змащені дизельним паливом (рисунок 3.7).

За даними спостережень під мікроскопом можна зробити висновок, що наявні на поверхні сколу гранули аміачної селітри пори знаходяться в межах від 3 % до 8 %. Проте ця частина поверхні існуючих пор гранули залишається не реалізованою, оскільки вона знаходиться в закритому вигляді.

Дещо інша картина спостерігається на сколі гранули, яка оброблена ультразвуковим випромінюванням. По перше – вона має гладку і блискучу

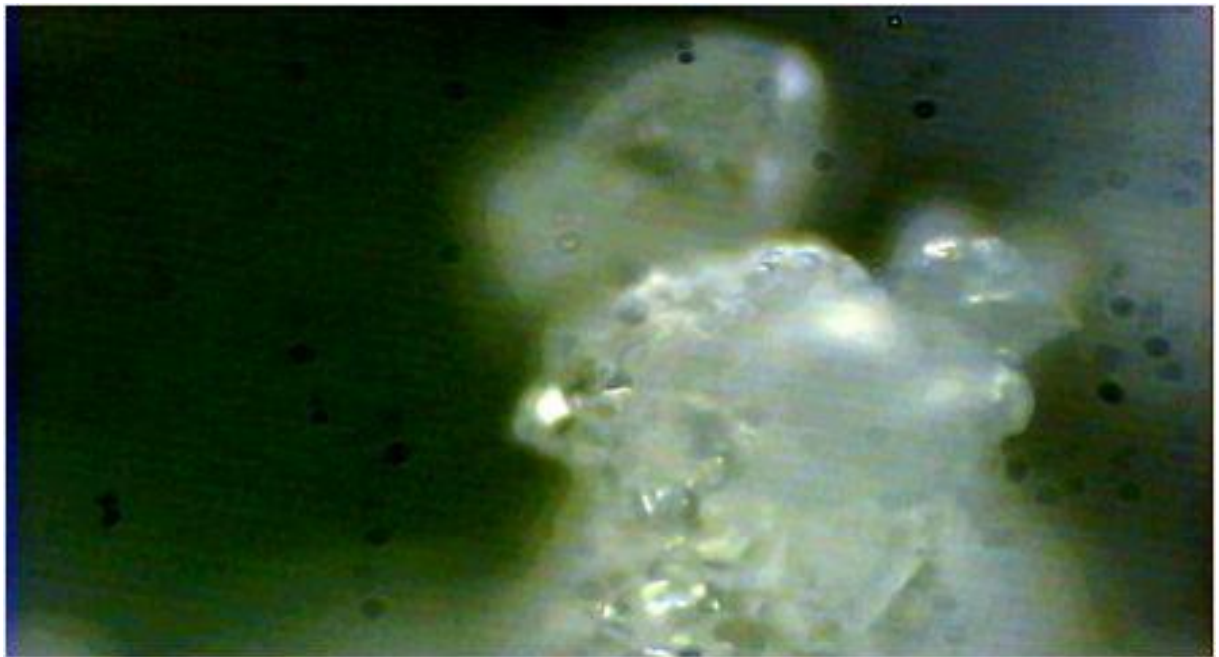
поверхню, це обумовлене тим, що за рахунок впливу ультразвукових хвиль відбувається тертя між гранулами селітри, що в свою чергу сприяє відділенню слабо з'єднаних мікрочасток від гранули. По друге – екваторіальний скол гранули показує, що в ній наявний канал, тобто поверхня гранули має тріщинуватий характер, а це дозволить збільшити активну площу поверхні гранули за рахунок відкриття каналу до поверхні внутрішніх пор [87].



а



б



в

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд поверхні пор гранульованої аміачної селітри глибиною 40 мкм: а, б – поверхня дна пори; в – поверхня зразка



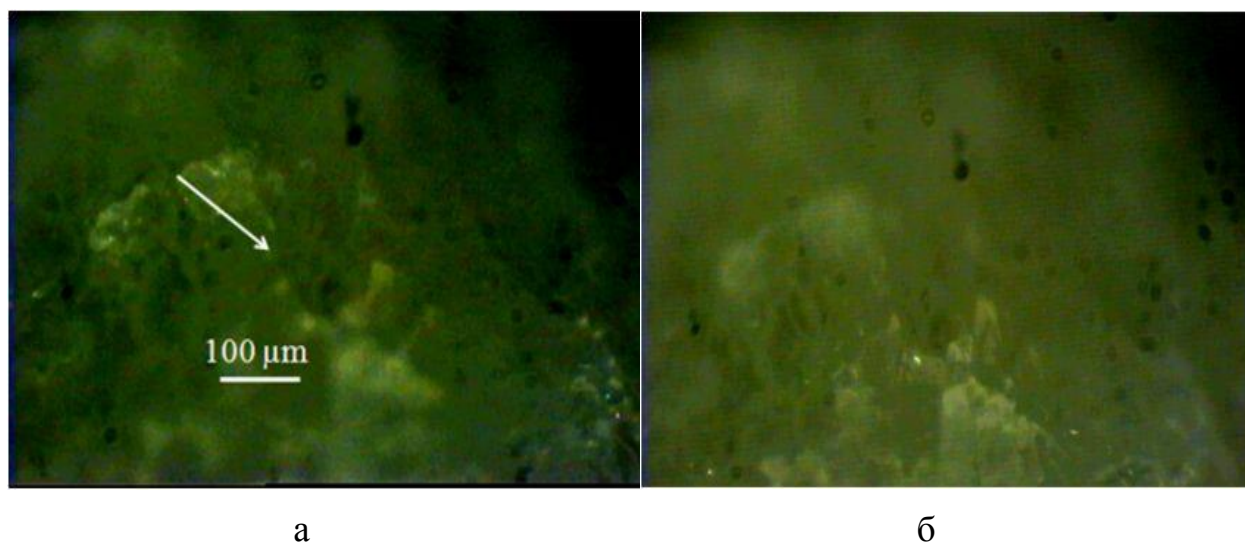


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд поверхні пор гранульованої аміачної селітри глибиною 60 мкм: а – поверхня дна пори; б – поверхня зразка

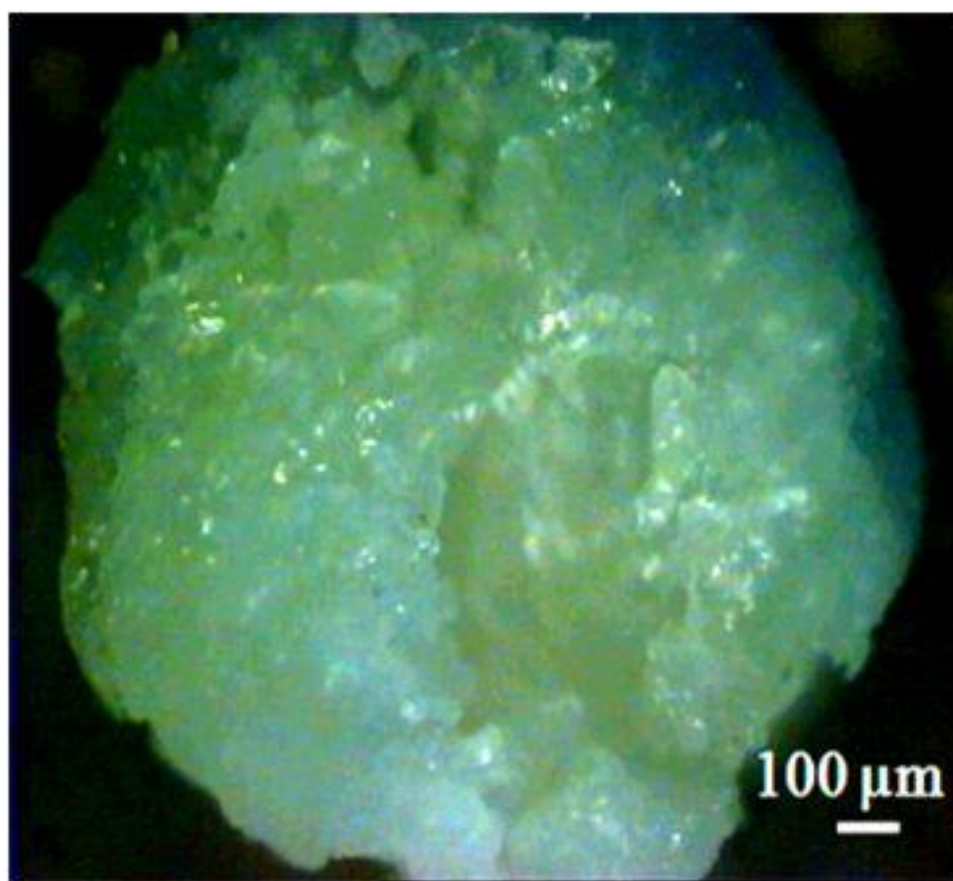
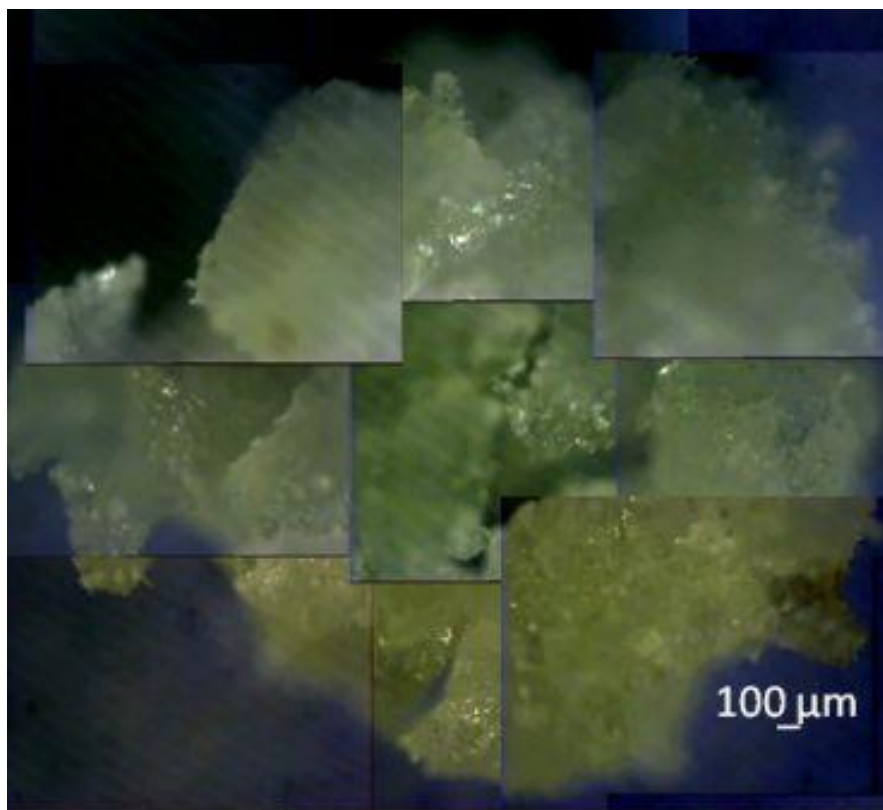
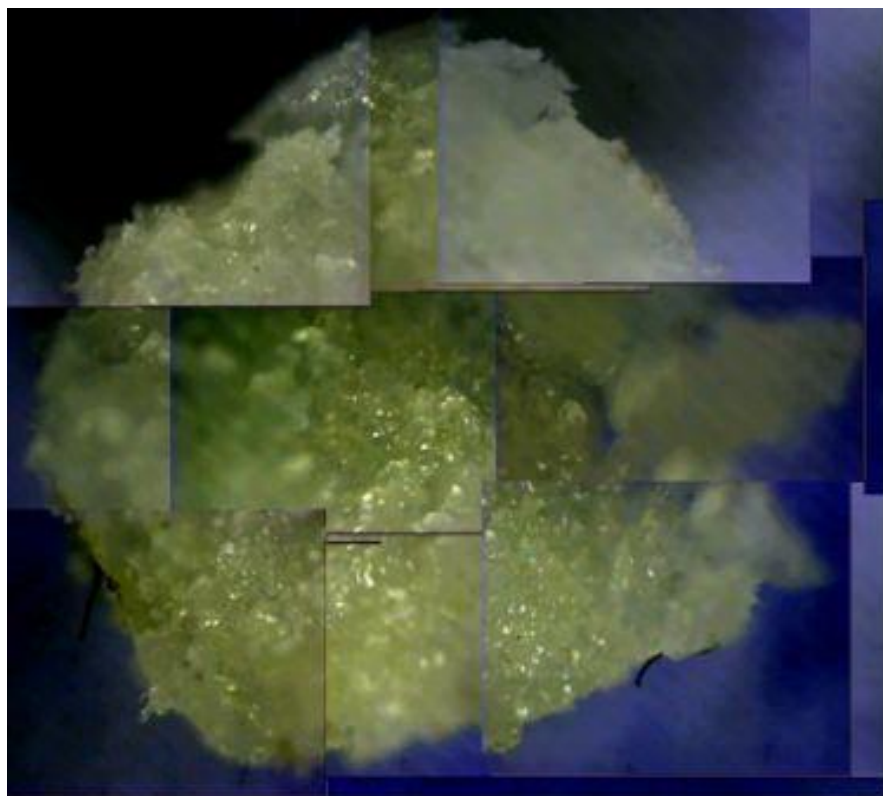


Рисунок 3.5 – Зображення сколу гранули аміачної селітри після ультразвукової обробки



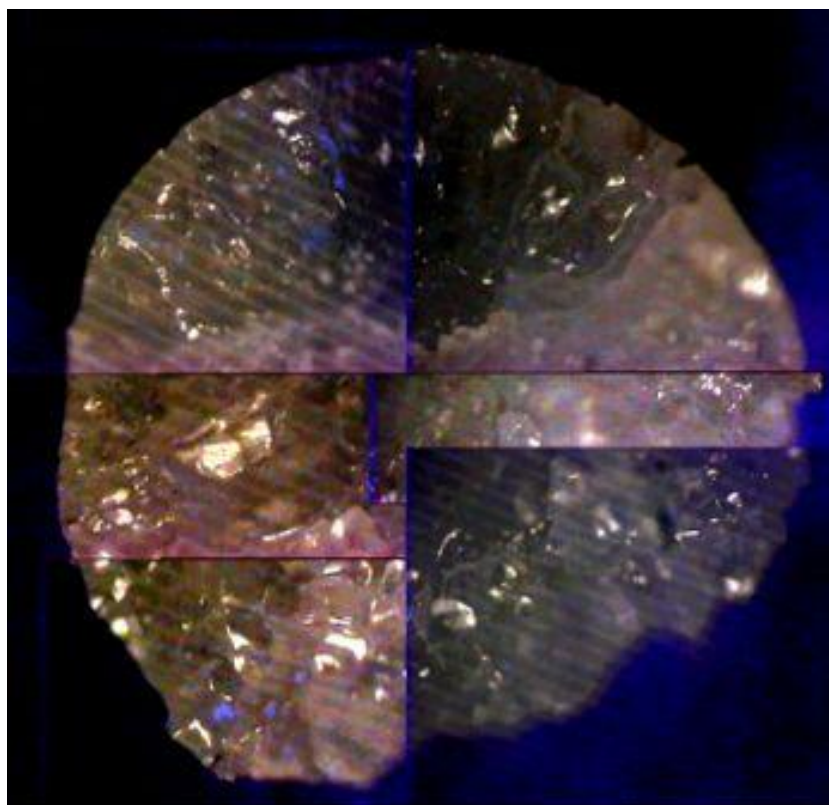
а



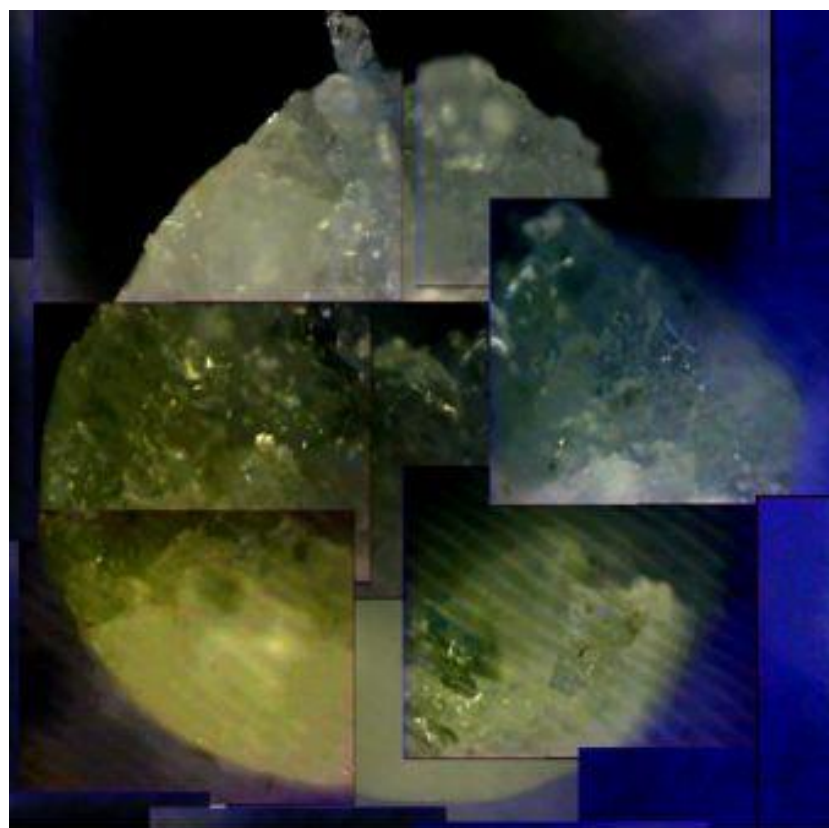
б

Рисунок 3.6 – Зображення сколу двох півсфер (а,б) гранули аміачної селітри після обробки індустріальною оливою





а



б

Рисунок 3.7 – Зображення сколу двох півсфер (а, б) гранул аміачної селітри з дизельним паливом після ультразвукової обробки

З рисунку 3.6 видно, що гранула має жовтуватий відтінок, а на рисунок 3.7 більш темного відтінку. Гранули аміачної селітри, які оброблені УЗ хвилями (рисунок 3.5, 3.7) мають гладку поверхню, це обумовлене тим, що за рахунок тертя між ними відбувається відділення часток, які слабо з'єднані з гранулою.

Як видно з фотографій (рисунок 3.5 – 3.7) поверхня гранул є щільною та блискучою. Екваторіальний скол гранули показує, що в ній наявний канал. Поверхня гранул має тріщинуватий характер.

### **3.2 Забезпечення стабільності фізичних характеристик аміачної селітри за допомогою ультразвукового випромінювання**

Оскільки активна поверхня площі гранул АС обробленої ультразвуковим випромінюванням залежить від відкритої і закритої пористості доцільно більш детально розглянути повну пористість АС.

При цьому можна виділити кілька категорій пористості [91]:

- повна (або загальна) пористість;
- відкрита пористість (або пористість насичення);
- замкнута (або ефективна) пористість.

Повна пористість аміачної селітри складається з відкритої пористості – це наявність пустот, укладених між зернами селітри, каверн і тріщин та закритої пористості – це замкнуті пори селітри. Коефіцієнт відкритої пористості можна визначити згідно з ГОСТ 33832. Кількісно пористість характеризується коефіцієнтом пористості, який являє собою відношення об'єму пор, тріщин, каверн і замкнутих пор до загального об'єму зразка селітри, і виражається в частках одиниці або відсотках.

В експерименті застосовувались наступні матеріали: олива індустріальна марки І-40А з наступними параметрами: кінематична в'язкість – 68 мм<sup>2</sup>/с при температурі 40 °С, щільність – 0,88 г/см<sup>3</sup> при температурі 20 °С, масова частка сірки не більше 1 %, зольність не більше 0,1 %; щільна

гранульована аміачна селітра фірми ПАТ «Рівнеазот» України і пориста аміачна селітра фірми «Акрон».

Крім того, для проведення лабораторних досліджень, використовували стандартне лабораторне обладнання, а саме; ваги неавтоматичної дії з похибкою вимірювань  $\pm 0,01$  г; стакани об'ємом  $600\text{ см}^3$  згідно ГОСТ 25336 [92], колба конічна об'ємом  $150\text{ см}^3$  (допускається використання конічної колби об'ємом  $250\text{ см}^3$ ); баня водяна термостатична, з термостатичною похибкою не більше  $1^\circ\text{C}$ , яка забезпечує робочі температури  $25^\circ\text{C}$  і  $50^\circ\text{C}$ ; пластмасова воронка з циліндричними стінками на верхньому кінці з діаметром рівним  $200\text{ мм}$ ; сито розміром  $0,5\text{ мм}$  згідно ГОСТ 3826 [93], яке сумісне з воронкою; фільтрувальний папір швидкої фільтрації з щільністю  $150\text{ г/м}^2$ ; вбираюча тканина.

Підготовка зразків для випробування була наступною: спочатку відбирались проби АС масою  $(70\pm 5)$  грам методом квартування і засипались в конічні колби з герметичною пробкою (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Зразки гранульованої аміачної селітри

Ці колби нагрівались на водяній бані до температури  $+ 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  та витримувались при даній температурі протягом 2 годин. Потім охолоджують ці колби, помістивши їх у водяну баню з температурою  $+ 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 2 годин. При цьому спостерігали за рівнем води у водяній бані, який не повинен бути нижче рівня проби аміачної селітри (рисунок 3.9). Після чого ці проби зберігались при температурі  $(20 \pm 3)\text{ }^{\circ}\text{C}$  до проведення експерименту.



Рисунок 3.9 – Охолодження зразків аміачної селітри

Експеримент проводився для двох незалежних випробувань протягом короткого проміжку часу на двох пробах. Послідовність виконання експерименту була наступною: спочатку видалили частинки гранул АС розміром менше ніж  $0,5\text{ мм}$  за допомогою сита. Пробу вагою  $(50 \pm 1)\text{ грам}$  помістили в скляну колбу. Потім в колбу наливали індустріальну оливу марки І-40А (рисунок 3.10) доки воно повністю не покриє гранули АС, обережно перемішували таким чином, щоб поверхня всіх гранул була повністю змочена. У накритій склом колбі зразок АС витримувався протягом 1 години при температурі  $(25 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Після чого через воронку з ситом фільтрували зразок

АС протягом 1 години для повного стікання надлишкової оливи (рисунок 3.11). В наступному етапі для остаточного видалення надлишку оливи зразок АС рівномірно за допомогою м'якої плоскої кісточки поміщали на аркуш фільтрувального паперу розміром 500х500 мм. з попередньо загнутими зі всіх боків кінців приблизно на 40 мм для запобігання скатування гранул АС, в середині якої розміщена всмоктуюча тканина.



Рисунок 3.10 – Проби аміачної селітри, змішаної з індустріальною оливою



Рисунок 3.11 – Фільтрація оливи через сито



Через 2 хвилини гранули АС переміщали на фільтрувальний папір. Накривши зверху ще одним аркушем фільтрувального паперу катали гранули АС приклавши незначне зусилля за рахунок 8 кругових рухів. Потім, піднімаючи протилежні краї паперу переміщують зразок АС до центру. Після проведення трьох таких операцій дослідний зразок обережно переміщують на чистий аркуш фільтрувального паперу і повторюють вище описану операцію (рисунок 3.12). Одразу після катання гранули поміщали в попередньо зважену чашу і зважували з точністю до  $\pm 0,01$  гр.

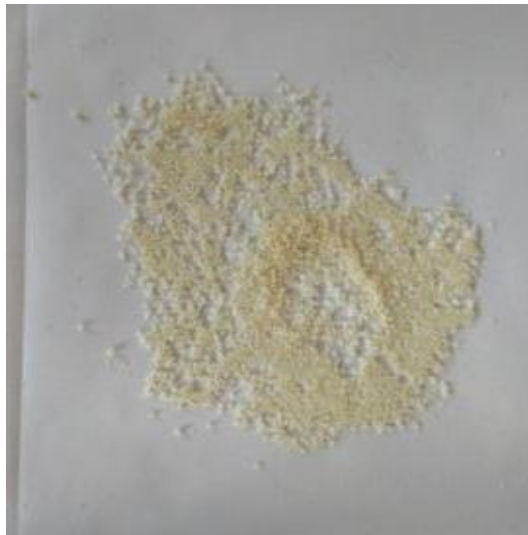


Рисунок 3.12 – Проба аміачної селітри після процедури катання на фільтраційному папері

Пористість аміачної селітри, обробленої ультразвуковим випромінюванням протягом 2, 4 та 6 хвилин з частотою  $22 \pm 1,65$  кГц визначали аналогічним чином.

Відкрита пористість аміачної селітри ( $X$ , %) як обробленої ультразвуковим випромінюванням, так і без, визначається за формулою:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (3.1)$$

де  $m_2$  – маса проби зразка після просіювання, яка дорівнює 50 г;  
 $m_1$  – маса проби після оброки, г.

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень визначається за формулою:

$$X_{cp} = \frac{X_1 + X_2}{2}. \quad (3.2)$$

Закрита пористість аміачної селітри визначається за формулою:

$$m_{закр} = m_{повна} - X_{cp}, \quad (3.3)$$

де  $m_{повна}$  – повна пористість, %,  $X_{cp}$  – відкрита пористість, %.

Визначити повну (абсолютну) пористість селітри можна методом Мельчера (вимірювання повної пористості) [87]. Даний метод заснований на тому, що маса проекстрагованого і висушеного зразка є величина постійна як для гранульованої аміачної селітри, так і після її подрібнення.

Таким чином, повна пористість селітри може бути визначена, якщо відомі щільність зразка і щільність (скелету) частинок аміачної селітри.

Щільність гранульованої (щільної) селітри становить  $\rho_{обр} = 0,88 \text{ г/см}^3$ , щільність (скелету) частинок аміачної селітри  $\rho_{тв} = 1,725 \text{ г/см}^3$ ; для пористої селітри відповідно –  $\rho_{обр} = 0,75 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{тв} = 1,725 \text{ г/см}^3$ .

Якщо виразити об'єм скелету (твердої частини) аміачної селітри через щільність, тоді повну пористість можна визначити за формулою:

$$m_{повна} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = \left(1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}}\right) 100\% \quad (3.4)$$

де  $V_{\text{зразка}}$  – об’єм пор зразка;  $\rho_{\text{зразка}}$  і  $\rho_{\text{тв}}$  – щільність зразка селітри і його твердої частини (скелету або зерен).

Підставивши у формулу 3.4 відповідні значення, отримаємо:

для гранульованої «щільної» АС:

$$m_{\text{повна}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,88}{1,725}\right) 100 = 49\%$$

для гранульованої «пористої» АС:

$$m_{\text{повна}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,75}{1,725}\right) 100 = 56,5\%$$

Отже, знаючи повну пористість, за формулами 3.1– 3.3 проводимо розрахунки отриманих експериментальних даних для визначення відкритої та закритої пористості:

– для гранульованої «щільної» АС:

$$X_{\text{1цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,15}{54,15} 100 = 7,66\%$$

$$X_{\text{1цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,05}{54,05} 100 = 7,49\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X_{\text{ср.цїл}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,66 + 7,49}{2} = 7,575\%$$

Закрита пористість:

$$m_{\text{закр.цїл}} = m_{\text{повна}} - X_{\text{ср.цїл}} = 49 - 7,575 = 41,425\%$$

– для гранульованої «пористої» АС:

$$X_{\text{1пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,93}{53,93} 100 = 7,29\%;$$

$$X_{\text{1пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,76}{53,76} 100 = 6,99\%.$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X_{\text{ср.пор}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,29 + 6,99}{2} = 7,14\%$$



Закрита пористість:

$$m_{закр.пор} = m_{повна} - X_{ср.пор} = 56,5 - 7,14 = 49,36\%$$

Аналогічно проводимо розрахунки щільної та пористої аміачної селітри після ультразвукової обробки:

– з ультразвуковою обробкою протягом 2 хвилин:

$$m_{повна(щіл.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = (1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}})100\% = (1 - \frac{0,887}{1,725})100 = 48,6\%$$

$$m_{повна(пор.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = (1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}})100\% = (1 - \frac{0,763}{1,725})100 = 55,8\%$$

$$X^{yz}_{2щіл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,85}{53,85} 100 = 7,15\%$$

$$X^{yz}_{2щіл} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,875}{53,875} 100 = 7,19\%$$

$$X^{yz}_{2пор} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,05}{54,05} 100 = 7,49\%$$

$$X^{yz}_{2пор} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,02}{54,02} 100 = 7,44\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X^{yz}_{ср.щіл} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,15 + 7,19}{2} = 7,17\%$$

$$X^{yz}_{ср.пор} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,49 + 7,44}{2} = 7,47\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m^{yz}_{закр.щіл} = m_{повна} - X^{yz}_{ср.щіл} = 48,6 - 7,17 = 41,43\%$$

$$m^{yz}_{закр.пор} = m_{повна} - X^{yz}_{ср.пор} = 55,8 - 7,47 = 48,33\%$$

– з ультразвуковою обробкою протягом 4 хвилин:

$$m_{повна(щіл.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = (1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}})100\% = (1 - \frac{0,891}{1,725})100 = 48,3\%$$

$$m_{повна(пор.)} = \frac{V_{зразка} - V_{тв}}{V_{зразка}} = (1 - \frac{\rho_{зразка}}{\rho_{тв}})100\% = (1 - \frac{0,77}{1,725})100 = 55,4\%$$

$$X^{yz}_{2\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,15}{54,15} 100 = 7,66\%$$

$$X^{yz}_{2\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,18}{54,1} 100 = 7,58\%$$

$$X^{yz}_{2\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,2}{54,2} 100 = 7,75\%$$

$$X^{yz}_{2\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,17}{54,17} 100 = 7,7\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X^{yz}_{\text{ср.цїл}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,66 + 7,58}{2} = 7,62\%$$

$$X^{yz}_{\text{ср.пор}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,75 + 7,7}{2} = 7,73\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m^{yz}_{\text{закр.цїл}} = m_{\text{повна}} - X^{yz}_{\text{ср.цїл}} = 48,3 - 7,62 = 40,68\%$$

$$m^{yz}_{\text{закр.пор}} = m_{\text{повна}} - X^{yz}_{\text{ср.пор}} = 55,4 - 7,73 = 47,67\%$$

– з ультразвуковою обробкою протягом 6 хвилин:

$$m_{\text{повна(цїл.)}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = (1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}) 100\% = (1 - \frac{0,891}{1,725}) 100 = 48,3\%$$

$$m_{\text{повна(пор.)}} = \frac{V_{\text{зразка}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{зразка}}} = (1 - \frac{\rho_{\text{зразка}}}{\rho_{\text{тв}}}) 100\% = (1 - \frac{0,77}{1,725}) 100 = 55,4\%$$

$$X^{yz}_{2\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,87}{53,87} 100 = 7,18\%$$

$$X^{yz}_{2\text{цїл}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 53,88}{53,88} 100 = 7,2\%$$

$$X^{yz}_{2\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,18}{54,18} 100 = 7,72\%$$

$$X^{yz}_{2\text{пор}} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100\% = \frac{50 - 54,17}{54,17} 100 = 7,7\%$$

Середнє арифметичне значення двох паралельних визначень:

$$X_{\text{ср.щіл}}^{\text{уз}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,18 + 7,2}{2} = 7,19\%$$

$$X_{\text{ср.пор}}^{\text{уз}} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{7,72 + 7,7}{2} = 7,71\%$$

Закрита пористість пористої АС після ультразвукової обробки:

$$m_{\text{закр.щіл}}^{\text{уз}} = m_{\text{повна}} - X_{\text{ср.щіл}}^{\text{уз}} = 48,3 - 7,19 = 41,11\%$$

$$m_{\text{закр.пор}}^{\text{уз}} = m_{\text{повна}} - X_{\text{ср.пор}}^{\text{уз}} = 55,4 - 7,71 = 47,69\%$$

Результати визначень відкритої, закритої та повної пористості різних типів аміачної селітри як до, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив ультразвукового випромінювання на категорії пористості аміачної селітри

Селітра	Повна пористість, %	Відкрита пористість, %	Закрита пористість, %
Гранульована (щільна) АС	49	7,575	41,425
Пориста АС	56,5	7,14	49,36
Гранульована (щільна) АС після ультразвукової обробки			
2 хв.	48,6	7,17	41,43
4 хв.	48,3	7,62	40,68
6 хв.	48,3	7,19	41,11
Пориста АС після ультразвукової обробки			
2 хв.	55,8	7,47	48,33
4 хв.	55,4	7,73	47,67
6 хв.	55,4	7,71	47,69

Наведені дані свідчать про те, що вплив ультразвукового випромінювання на пористість аміачної селітри носить наступний характер: при впливі ультразвуку на АС протягом 2 хвилин зменшується пористість на 0,4 % для щільної АС і 0,7 % для пористої АС, тобто відбувається ущільнення АС. При цьому відкрита пористість для щільної АС зменшується на 0,4 %, для пористої АС збільшується на 0,3 %, закрита пористість для щільної АС

залишається практично незмінною, для пористої АС зменшується на 1 %. Обробка АС ультразвуком протягом 4 хвилин зменшується пористість на 0,7 % для щільної АС і на 1,1 % для пористої АС. Відкрита пористість для щільної АС дещо збільшується, а закрита зменшується на 0,7 %. Для пористої АС відповідно: відкрита пористість збільшується на 0,6 %, а закрита зменшується на 1,7 %. Після 6 хвилинної обробки пористість для обох типів селітри залишається практично незмінною.

Аналіз експериментальних досліджень свідчить про те, що ультразвукове випромінювання аміачної селітри дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яке виникає за рахунок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС, внаслідок утворення каналів до внутрішніх пор гранул. Водночас цей вплив носить нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Це підтверджується максимальним перерозподілом відкритої і закритої пористості. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

Для підтвердження отриманих результатів визначено **утримуючу здатність АС** за допомогою статичного методу, який оснований на дії сил тяжіння. Послідовність проведення дослідження наступна: спочатку пробу АС масою 100 г засипали в склянку ємністю 600 см<sup>3</sup>. ДП масою 20 г наливали в хімічний стакан і переносили в склянку з аміачною селітрою таким чином, щоб рідина рівномірно змочила всі гранули. Для цього аміачну селітру і дизельне паливо ретельно перемішували. Просочення гранул ДП тривала протягом 20 хв, після чого суміш розміщували на сито і не вбране в гранули дизельне паливо вільно стікало з сита протягом 1 доби.

Утримуюча здатність щільної та пористої аміачної селітри як у звичайному стані, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням

протягом 2, 4 та 6 хвилин з частотою  $22 \pm 1,65$  кГц досліджувалась за допомогою дизельного палива, яке відповідає сучасним стандартам якості та вимогам екологічного стандарту Євро 5.

Обробка аміачної селітри ультразвуком проводилась в Інституті надтвердих матеріалів імені В.Н. Бакуля наступним чином. Від ультразвукового генератора УЗГ5-1,6/22 (рисунок 3.13) до обмотки збудження перетворювача підводиться дві напруги: постійна і змінна. Під дією постійної напруги через обмотки 8-ми пакетів протікає постійний струм поляризації. Перемінна напруга створює струм збудження. В двигуні, таким чином, утворюються поздовжні механічні коливання. Ці коливання передаються на діафрагму (на якій розміщена суміш аміачної селітри та дизельного палива (АС/ДП)) і далі на воду, яку заповнюють таким чином, щоби її рівень був на рівні суміші АС/ДП в склянці (рисунок 3.14).



Рисунок 3.13 – Ультразвуковий генератор УЗГ5-1,6/22 [94]

Кавітація, яка утворює умови для переходу суміші у високодисперсний стан з утворенням однорідної і хімічно чистої суміші. В процесі обробки, при виборі оптимального значення інтенсивності ультразвуку варто мати на увазі,

що при занадто малій інтенсивності кавітаційні процеси не розвиваються, а надмірне підвищення інтенсивності для даної частоти приводить до значного зростання розтягу максимального радіуса кавітаційної площини, що приводить до послаблення кавітаційних процесів. Поріг кавітації залежить від фізико-хімічних властивостей рідини і, особливо, від частоти ультразвуку [95].

Акустична кавітація є ефективним засобом перетворення енергії звукової хвилі низької щільності в енергію високої щільності, пов'язану з пульсаціями і утворенням кавітаційних бульбашок. У фазі розрідження акустичної хвилі в рідині утворюється розрив у вигляді порожнини, яка заповнюється насиченою парою цієї рідини. У фазі стиснення під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягу порожнина зачиняється. Через стіни порожнини в неї проникає розчинений у рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стисненню.



Рисунок 3.14 – Розміщена проба АС/ДП на діафрагмі з заповненою водою

Так, для збудження кавітації у воді при 20 кГц потрібна інтенсивність звуку близько  $1 \text{ Вт/см}^2$ , при 200 кГц –  $10 \text{ Вт/см}^2$ , при 500 кГц –  $200 \text{ Вт/см}^2$ , а при 3 мГц –  $50 \text{ кВт/см}^2$ . Ультразвуковий вплив на суміш протікає з частотою

$22 \pm 1,65$  кГц при інтенсивності звуку в межах від часток Вт/см<sup>2</sup> до декількох Вт/см<sup>2</sup> (таблиці 3.72) [87, 94, 96 – 99].

Таблиця 3.2 – Режим роботи УЗГ5-1,6/22

Назва	Величина
Напруга живлячої мережі, В	220/380
Число фаз	3 з нулем
Частота живлячої мережі, Гц	50
Максимальна потужність, споживана від мережі, кВА	4
Потужність вихідна номінальна, кВт	1,6
Робоча частота, кГц	$22 \pm 1,65$
Струм підмагнічування, А	10
Вага, кг	235

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом (ДП) визначаємо за формулою [87]:

$$m_{\text{сер}} = \frac{m_1 + m_2}{2}, \quad (3.5)$$

де  $m_1, m_2$  – маса утриманого ДП двох зразків для АС.

Утримуюча здатність аміачної селітри визначається за формулою [87]:

$$X = \frac{m_{\text{сер}} - m}{m_{\text{сер}}} \quad (3.6)$$

де  $m_{\text{сер}}$  – середня маса утриманого дизельного палива з аміачною селітрою, г;

$m$  – маса проби аміачної селітри, г.

Визначмо за формулами 3.5, 3.6 утримуючу здатність аміачної селітри як з обробкою ультразвуком, так і без.

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри без ультразвукової обробки, г:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_1 + m_2}{2} = \frac{102,9 + 102,96}{2} = 102,925$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри без ультразвукової обробки, %:

$$X_{\text{щіл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{102,925 - 100}{102,925} \cdot 100 = 2,84$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри без ультразвукової обробки, г:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_3 + m_4}{2} = \frac{104,6 + 104,64}{2} = 104,62$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри без ультразвукової обробки, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{104,62 - 100}{104,62} \cdot 100 = 4,416$$

Після обробки ультразвуком отримали:

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_5 + m_6}{2} = \frac{103,81 + 103,79}{2} = 103,8$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{щіл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{103,8 - 100}{103,8} \cdot 100 = 3,66$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, г:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_7 + m_8}{2} = \frac{105,5 + 105,47}{2} = 105,485$$



Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{щіл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{105,485 - 100}{105,485} \cdot 100 = 5,2$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для щільної аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.щільна}} = \frac{m_9 + m_{10}}{2} = \frac{104,72 + 104,71}{2} = 104,715$$

Утримуюча здатність щільної аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{щіл}} = \frac{m_{\text{сер.щільна}} - m}{m_{\text{сер.щільна}}} \cdot 100 = \frac{104,715 - 100}{104,715} \cdot 100 = 4,5$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{11} + m_{12}}{2} = \frac{105,74 + 105,71}{2} = 105,725$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 2 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{105,725 - 100}{105,725} \cdot 100 = 5,415$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{13} + m_{14}}{2} = \frac{106,89 + 106,89}{2} = 106,865$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 4 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{106,865 - 100}{106,865} \cdot 100 = 6,424$$

Середня маса аміачної селітри з утриманим дизельним паливом для пористої аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, г.:

$$m_{\text{сер.пориста}} = \frac{m_{15} + m_{16}}{2} = \frac{106,3 + 106,34}{2} = 106,32$$

Утримуюча здатність пористої аміачної селітри після 6 хвилин обробки ультразвуком, %:

$$X_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{сер.пориста}} - m}{m_{\text{сер.пориста}}} \cdot 100 = \frac{106,32 - 100}{106,32} \cdot 100 = 5,944$$

Результати визначень утримуючої здатності аміачної селітри відносно дизельного палива без та з обробкою її ультразвуком протягом 1 доби наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Утримуюча здатність аміачної селітри відносно дизельного палива

Селітра	Утримуюча здатність, %	Збільшення утримуючої здатності після УЗ обробки порівняно з початковою утримуючою здатністю, %
Щільна		
АС+ДП без УЗ	2,84	-
АС+ДП УЗ (2хв)	3,66	28,8
АС+ДП УЗ (4хв)	5,2	83,1
АС+ДП УЗ (6хв)	4,6	62
Пориста		
АС+ДП без УЗ	4,416	-
АС+ДП УЗ (2хв)	5,415	22,62
АС+ДП УЗ (4хв)	6,424	45,5
АС+ДП УЗ (6хв)	5,944	34,6

Утримуюча здатність щільної та пористої аміачної селітри має досить низькі показники, що становлять: для щільної АС – 2,84 %, для пористої АС –

4,416 %. Після ультразвукової обробки значення утримуючої здатності становлять: для щільної АС після 2 хвилин обробки – 3,66 % (більше на 28,8 %, порівняно з початковою), після 4 хвилин – 5,2 % (тобто зростає на 83,1 %) та після 6 хвилин – 4,6 % (більше на 62 %); для пористої АС утримуюча здатність після обробки її протягом 2, 4, 6 хвилин становить відповідно: 5,415 %, 6,424 %, 5,944 % (утримуюча здатність збільшилася на 22,62 %, 45,5 %, 34,6 % відповідно), тобто, найбільший ефект досягається при обробці АС ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин коли максимальна утримуюча здатність дизельного палива в пористій селітрі зростає з 4,416 % до 6,424 % або в 1,45 рази..

Аналіз експериментальних досліджень свідчить про те, що ультразвукове випромінювання аміачної селітри дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність за рахунок збільшення активної площі поверхні, яке виникає за рахунок перерозподілу відкритої і закритої пористості як для щільної так і пористої АС, внаслідок утворення каналів до внутрішніх пор гранул. Водночас цей вплив носить нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Це підтверджується максимальним перерозподілом відкритої і закритої пористості. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

За результатами експериментальних досліджень було побудовано залежності утримуючої здатності АС від часу її обробки ультразвуком відносно дизельного палива (рисунок 3.15).

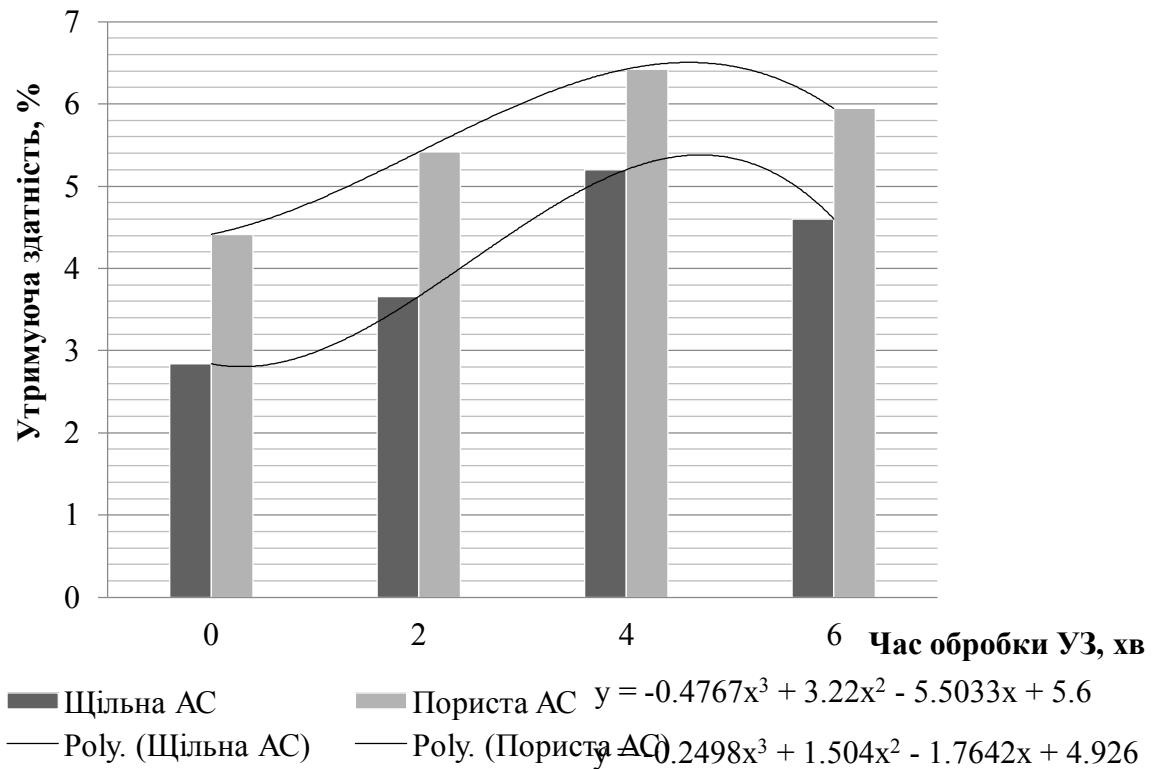


Рисунок 3.15 – Аналіз впливу ультразвукової обробки на утримуючу здатність щільної та пористої АС відносно ДП

Зниження утримуючої здатності АС при обробці її ультразвуком понад 4 хвилин можна пояснити тим, що при тривалій дії ультразвуку починають руйнуватись самі гранули, що призводить до збільшення щільності самої АС, а відповідно, зменшення її активної поверхні.

Отже, вплив ультразвукових хвиль на гранули аміачної селітри супроводжується наступними ефектами: інтенсифікуються процеси переносу ваги, підвищується температура оброблюваного матеріалу, відбувається перерозподіл тиску за об'ємом пресування, він стає більш рівномірним через зниження пристінного тертя, а за рахунок руйнування внутрішніх перегородок в гранулах збільшується активна площа поверхні АС.

### **3.3 Формування вибухових параметрів спієених водонаповнених композицій оброблених ультразвуковим випромінюванням**

Ущільнення просадних нестійких ґрунтів є основним технологічним процесом, і вирішення цього питання та пошук оптимізованих рішень займають значущу роль в будівельній промисловості та військовій справі.

У попередньому розділі запропоновано вдосконалені малоцільні сумішеві та спієені вибухові речовини для ущільнення просадних лесових ґрунтів. Важливим фактором є забезпечення фізичної стабільності ВР такого класу, особливо при ущільненні значної площі, а також забезпечити відповідну продуктивність і рівень безпеки робіт при виготовленні значних об'ємів готового продукту для великих зарядів.

Вдосконалення вибухової технології повинно бути направлено на забезпечення фізичної стабільності і динамічних характеристик спієених вибухових композицій для ефективного використання при ущільненні просадних лесових ґрунтів та розмінуванні мінних полів та створення безпеки проведення безпосередньо самих вибухових робіт [100].

Запропонований у добір компонентного складу спієених вибухових композицій місцевого приготування на основі порошкоподібних і рідких ПАР дозволяє керування параметрами вибухового імпульсу шляхом використання ВР регульованої щільності, що в свою чергу, забезпечує можливість їх використання для рівномірного ущільнення просадних лесових ґрунтів на необхідну потужність.

Основним недоліком запропонованих спієених ВР є низька фізична стабільність композиту, особливо у відкритому заряді, яка становить 9–24 год. в діапазоні температур від +30 до -10°C, а при зниженні температури до -15°C ця стабільність різко падає, що призводить до руйнування піни. При цьому структура системи руйнується, газові включення укрупнюються, що обумовлює зниження чутливості системи до підривного імпульсу. Це пов'язано з тим, що приготування композиту проводиться шляхом введення

піноутворювача у гранульовану, а не подрібнену аміачну селітру, що призводить до зниження детонаційної чутливості та зменшення утримуючої здатності виготовлених водонаповнених спінених вибухових композицій.

Одним з основних параметрів, що характеризує фізичну стабільність водонаповнених спінених вибухових композицій на основі аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води є утримуюча здатність аміачної селітри. У третьому розділі встановлено, що обробка аміачної селітри (АС) ультразвуком дозволяє суттєво збільшити її утримуючу здатність. Водночас ці результати мають нелінійний характер. Тобто, на першому етапі при збільшенні часу обробки ультразвуком до 4 хвилин утримуюча здатність АС збільшується і становить максимум. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

Вплив ультразвукового випромінювання на фізичну стабільність запропонованих спінених пастоподібних ВР наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вплив ультразвукового випромінювання на характеристики спінених пастоподібних ВР (суміш)

№ п/п	Компоненти ВР	Вміст компонентів, мас. %				
		Суміш I	Суміш II	Суміш III	Суміш IV	Суміш V
1	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C:					
	– у відкритій посудині, год.	9-10	10-12	14-17	20-24	15-18
	– у закритій посудині, діб	5-7	6-7	5-8	–	6-8
2	Фізична стабільність в інтервалі температур від +30 до -10°C після обробки АС ультразвуком (4 хв.):					
	– у відкритій посудині, год.	11-14	11-15	16-20	23-28	18-24
	– у закритій посудині, діб	6-8	7-9	6-10	–	7-11

Як видно з приведених даних, фізична стабільність аерованої системи в діапазоні температур від +30 до -10°C у відкритій посудині для спінених композицій без обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить 9-24 год., а після ультразвукового випромінювання АС протягом 4 хвилин

знаходиться в межах 11-28 год. Аналогічний приріст фізичної стабільності спостерігається і в закритій посудині: без обробки АС ультразвуковим випромінюванням – 5-8 діб, а після обробки – 6-11 діб. Крім того, на фізичну стабільність спінених композицій суттєво впливає алюмінієва добавка, яка підвищує фізичну стабільність спінених композицій від 14-17 год. до 15-18 год. і від 5-8 діб до 6-8 діб відповідно для аерованих систем у відкритій і в закритій посудині без обробки АС ультразвуковим випромінюванням та від 16-20 год. до 18-24 год. і від 6-10 діб до 7-11 діб відповідно для аерованих систем у відкритій і в закритій посудині після обробки АС ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин.

Динамічні характеристики спінених сумішей досліджувалися як з обробкою АС ультразвуковим випромінюванням, так і без. При цьому вивчалася детонація відкритих зарядів діаметром  $(50-90) \cdot 10^{-3}$  м. Бризантність зарядів вивчалася за ГОСТ 5984-80 [101]. У всіх випадках досліджувались свіжоприготовлені спінені суміші, так як піносистеми змінюють свої характеристики в часі.

Динамічні характеристики спінених ВР наведені в таблиці 3.5. З наведених даних видно, що швидкість детонації відкритих зарядів ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить  $(1,0-2,5) \cdot 10^3$  м/с, а після обробки –  $(1,2-2,6) \cdot 10^3$  м/с. Бризантність спінених сумішей знаходиться в межах –  $(7-11) \cdot 10^{-3}$  м. як для ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням, так і без.

Час наростання тиску в імпульсі до максимуму у досліджених сумішей близькі і складають відповідно  $(40-60) \cdot 10^{-6}$  с для зарядів без обробки АС ультразвуковим випромінюванням і  $(45-65) \cdot 10^{-6}$  с для зарядів після обробки АС ультразвуковим випромінюванням. Тиск на фронті хвилі у спінених ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням на  $(0,05-0,1) \cdot 10^9$  Па вище, ніж у спінених ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням. Швидкість наростання тиску в імпульсі у спінених ВР після обробки АС ультразвуковим

випромінюванням становить  $(0,09 - 0,21) \cdot 10^{14} \text{Па/с}$ , у спінених ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням –  $(0,08 - 0,20) \cdot 10^{14} \text{Па/с}$ .

Таблиця 3.5 – Динамічні характеристики спінених ВР (суміш)

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР				
			Суміш І	Суміш ІІ	Суміш ІІІ	Суміш ІV	Суміш V
Без обробки АС ультразвуковим випромінюванням							
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	10 <sup>3</sup> м/с	1,0-2,4	1,0-2,5	—	—	1,0-2,2
	- заряд в жорсткій оболонці		1,1-3,2	1,1-3,0	1,9-2,1	2,0-2,2	2,1-2,3
2	Бризантність в сталюму кільці	10 <sup>-3</sup> м	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	10 <sup>-6</sup> с	40-50	45-50	50-55	50-60	55-60
4	Тиск на фронті хвилі	10 <sup>9</sup> Па	0,7-0,8	0,7-0,8	0,6-0,7	0,5-0,7	0,6-0,8
5	Швидкість зростання тиску	10 <sup>14</sup> Па/с	0,14-0,20	0,14-0,17	0,11-0,14	0,08-0,14	0,12-0,16
Після ультразвукового випромінювання АС протягом 4 хвилин							
1	Швидкість детонації: - відкритий заряд	10 <sup>3</sup> м/с	1,2-2,4	1,3-2,6	—	—	1,2-2,3
	- заряд в жорсткій оболонці		1,3-3,3	1,2-3,1	1,9-2,2	2,0-2,3	2,2-2,4
2	Бризантність в сталюму кільці	10 <sup>-3</sup> м	7-11	7-11	7-9	7-8	8-11
3	Час зростання тиску в імпульсі	10 <sup>-6</sup> с	45-50	45-55	50-55	55-65	55-65
4	Тиск на фронті хвилі	10 <sup>9</sup> Па	0,75-0,85	0,75-0,9	0,65-0,75	0,65-0,7	0,75-0,8
5	Швидкість зростання тиску	10 <sup>14</sup> Па/с	0,16-0,21	0,15-0,17	0,12-0,15	0,09-0,15	0,13-0,17

Аналіз наведених даних свідчить про те, що попередня обробка АС ультразвуковим випромінюванням значно покращує динамічні характеристики запропонованих спінених ВР. За рахунок попередньої обробки АС ультразвуковим випромінюванням та добавкою 3 – 4 % дисперсного алюмінію можна досягти значної фізичної стабільності та покращити динамічні характеристики запропонованих спінених вибухових композицій.



Дослідження динамічних характеристик спінених ВР змінної щільності показує, що описані вибухові суміші можуть ефективно використовуватися при ущільненні просадних лесових ґрунтів та розмінуванні мінних полів.

### **Висновки по розділу 3**

1. Гранули АС без дизельного палива, оброблені УЗ хвилями, на поверхні мають гладку поверхню, що обумовлене тим, що за рахунок тертя між гранулами селітри відбувається відділення часток від гранул, які слабо з'єднані з гранулою, а наявність каналу на екваторіальному сколі гранули свідчить про збільшення активної площі поверхні гранули за рахунок внутрішніх пор.

2. Під впливом ультразвукового випромінювання відбувається ущільнення АС, причому ущільнення щільної АС відбувається переважно за рахунок стиснення міжгранульного простору, а при ущільненні пористої АС спостерігається збільшення відкритої пористості і зменшення закритої за рахунок утворення каналів до внутрішніх пор гранул. Найбільший ефект перерозподілу відкритої і закритої пористості для обох типів АС спостерігається при обробці ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин. Відкрита пористість для щільної АС дещо збільшується, а закрита зменшується на 0,7 %. Для пористої АС відповідно: відкрита пористість збільшується на 0,6 %, а закрита зменшується на 1,7 %. Загальна пористість зменшується на 0,7 % для щільної АС і на 1,1 % для пористої АС.

3. Також при обробці АС ультразвуковим випромінюванням протягом 4 хвилин спостерігається найбільша утримуюча здатність як щільної так і пористої аміачної селітри, яка становить 5,2 % для щільної АС і 6,424 % для пористої АС, яка більша за необроблену АС відповідно на 83,1 % для щільної АС і на 45,5 % для пористої АС. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

4. Вплив ультразвукових хвиль на гранули аміачної селітри супроводжується наступними ефектами: інтенсифікуються процеси переносу ваги, підвищується температура оброблюваного матеріалу, відбувається перерозподіл тиску за об'ємом пресування, він стає більш рівномірним через зниження пристінного тертя, а за рахунок руйнування внутрішніх перегородок в гранулах збільшується активна площа поверхні АС.

5. Фізична стабільність аерованої системи в діапазоні температур від +30 до -10°C у відкритій посудині для спінених композицій без обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить 9-24 год., а після ультразвукового випромінювання АС протягом 4 хвилин знаходиться в межах 11-28 год. Аналогічний приріст фізичної стабільності спостерігається і в закритій посудині: без обробки АС ультразвуковим випромінюванням – 5-8 діб, а після обробки – 6-11 діб.

6. Швидкість наростання тиску в імпульсі у спінених ВР після обробки АС ультразвуковим випромінюванням становить  $(0,09 - 0,21) \cdot 10^{14}$  Па/с, у спінених ВР без обробки АС ультразвуковим випромінюванням –  $(0,08 - 0,20) \cdot 10^{14}$  Па/с.

7. За рахунок попередньої обробки АС ультразвуковим випромінюванням та добавкою 3 – 4 % дисперсного алюмінію можна досягти значної фізичної стабільності та покращити динамічні характеристики запропонованих спінених вибухових композицій.

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІТИЧНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ВИБУХОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ

#### **4.1 Аналітичні оцінки можливостей керування параметрами вибухового імпульсу для регулювання впливу на ґрунтовий масив**

Основні способи керування параметрами вибухового імпульсу полягають в управлінні контактним впливом зарядів ВР на навколишній масив, порядком підривання зарядів.

Характер такого впливу визначається:

- а) властивостями матеріалів ВР, хімічним складом, концентрацією;
- б) щільністю, дисперсністю і геометричними параметрами заряду;
- в) характером ініціювання;
- г) іншими конструктивними особливостями заряду;
- д) механічними властивостями масиву в приконтактній зоні;
- е) порядком підривання.

Різноманітність практичного застосування вибухових речовин, вибухових конструкцій і властивостей збурених вибухом масивів об'єктивно створюють передумови для найбільш раціонального використання енергії вибуху для різних цілей при будівництві та гірничому виробництві в цілому в тих чи інших умовах.

Однією з невирішених проблем є стабілізація детонації в не патронованих зарядах значної протяжності. Існує ряд причин нестационарного вибухового збурення і затухання детонаційного процесу, серед яких найбільш значними є:

- а) нерівномірність компонентів ВР і властивості гетерогенних (багатофазних середовищ);
- б) розвантажувальна дія межі заряду;
- в) не водостійкість (розмочування), обумовлена гідрофобними основною компонента, селітри;
- д) змінення параметрів вибухового перетворення на контакті різних ВР.

Існують і інші проблеми пов'язані з дією вибуху в зовнішньому середовищі. Якщо відбувається повне вибухове розкладання заряду, то необхідна амплітуда вибухового імпульсу, яка випромінюється в оточуюче середовище, знаходиться на відстані до 10 радіусів заряду і більше. У той же час різкий характер імпульсу призводить до надзвичайно швидкої дисипації енергії хвилі, при цьому вплив заряду у просторі відбувається досить нерівномірно. Це характерно для більшості промислових ВР зі швидкістю стаціонарної детонації понад 3,5 – 4 км/с.

Тому традиційною проблемою є зміна параметрів імпульсу, що дозволить максимально знизити непотрібні втрати енергії в бризантній зоні і збільшити радіус розповсюдження дією одного заряду.

Не менш важливою є проблема оптимального розташування свердловин по масиву, що дозволяє підібрати параметри сповільнення, які забезпечать необхідний режим підривання для досягнення максимального ефекту використання енергії вибуху.

Крім того, важливим фактором в умовах реальних ґрунтових масивів є неоднорідність їхньої геологічної структури та фізико-механічних характеристик. Особливо ця неоднорідність проявляється у верхніх шарах ґрунтових наносів, де нерідко спостерігається вихідна шарувата структура масиву, пов'язана з його геологічним походженням. Однак, якщо об'єктом інженерної діяльності є лесовий просадний масив, склад його більш однорідний по глибині з рівномірним зростанням щільності або зменшенням поруватості в природному заляганні. Ситуація змінюється в зв'язку з застосуванням будь-якої технології ущільнення такого масиву. Вона передбачає попереднє його замочування для руйнування достатньо міцних природних в'язків між блоками і агрегатами, складеними з грантових часток і пов'язаними між собою соляними плівками, здатними розчинятися під дією надмірної вологи. Оскільки ця волога є практично нестисливою, вона під дією напружень на силовому фронті та поза ним вимушена переміщуватись відносно ґрунтового скелету. Швидкість переміщення ґрунтових часток і вологи прямо пропорційно пов'язані з

швидкістю спочатку ударної, а потім вибухової хвиль. В свою чергу швидкість ударної хвилі прямо пов'язана з швидкістю детонаційного фронту в заряді, тобто з енергією вибухової речовини в заряді. Таким чином, відома інерційність середовища в динамічному процесі розвитку деформацій підсилюється через взаємне переміщення компонентів, що складають ґрунт, оскільки посилюється вплив в'язкої складової на процес розвитку об'ємних деформацій.

З динаміки ґрунтів відомо [42], що інерційне багатокomпонентне ґрунтове середовище з відносно слабкими структурними зв'язками для повноцінного розвитку деформаційного процесу в динамічному режимі потребує більш повільного зростання і спадання навантаження в процесі проходження хвилі напружень. Це ставить відповідні вимоги до параметрів вибухового імпульсу, який забезпечує достатнє навантаження, що довше утримується в часі. Проблема може вирішитись лише застосуванням ВР з максимально низькою швидкістю детонації.

Рішення даного питання може бути здійснене наступними шляхами, що розглядаються в дисертаційній роботі:

1. Вдосконалення хімічного складу ВР. Оскільки на даний час практично всі основні компоненти низько бризантних ВР відомі, вдосконалення компонентного складу в залежності від конкретних цілей проводиться шляхом введення гідрофобних, каталітичних, інертних, квазіінертних (низькокалорійних) та інших добавок.

2. Обробка структури ВР або основного компоненту (селітри) з метою підвищення хімічної активності, яка ускладнена в грубо дисперсних ВР малою площею хімічного контакту. Мета – підвищення площі поверхні і часткова іонізація. Досягти можна за рахунок механічної (в тому числі ультразвукової) обробки, шляхом опромінення електромагнітними хвилями і зарядженими частинками.

На сучасному етапі розвитку засобів механізації зарядних робіт практичний інтерес представляє два способи покращення характеристик імпульсу, а саме: із застосуванням тонких зовнішніх оболонок з інертного

матеріалу; з використанням в довгих свердловинах проміжних бойовиків, які добре сприймають імпульс від основного слабшого ВР.

У рішенні інших проблем визначальним фактором є механічні властивості навколишнього масиву: імпеданс, міцність на стиск, дилатансія, умови крихкості, анізотропності, неоднорідності.

Для того, щоб керувати процесом вибухового імпульсу необхідно встановити наступні взаємозв'язки: параметрів заряджання, властивостей ґрунтового масиву в приконтатній зоні і вихідних параметрів вибухового імпульсу, що діють на середовище; механічних властивостей масиву і параметрів хвилі у зовнішньому середовищі; параметрів зовнішнього навантаження на ґрунтовий масив.

На основі чисельних експериментів і теоретичних досліджень, проведених в останні десятиліття, встановлено, що в ряді типових умов підривання зарядів ВР режим протікання реакції вибухового перетворення близький до стаціонарного, тобто швидкість поширення ударної хвилі близька до постійної.

Найпростішим квазістаціонарним режимом підривання циліндричного заряду є підривання з осьовим ініціюванням, що породжує циліндричну хвилю.

При цьому, до моменту виходу ударної хвилі на поверхню заряду, за виконання умови, коли продукти детонації (ПД) задовольняють рівнянню стану ідеального газу, поширення параметрів ПД за фронтом детонаційної хвилі (ДХ) описується системою звичайних диференціальних рівнянь відносно

автомодельної змінної  $\xi = \frac{h}{t}$ ,  $\xi = \frac{h}{t}$ .

$$\begin{cases} \frac{du}{d\xi} \left[ \frac{(\xi - u)^2}{C^2} - 1 \right] = \frac{u}{\xi} \\ (\xi - u) \frac{du}{d\xi} = \frac{C^2}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\xi} \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $h$  – радіальна координата Лагранжа,  $t$  – час,  $u$  – масова радіальна швидкість руху,  $C$  – швидкість звуку,  $\rho$  – щільність ПД.

В [102] наводиться наближене рішення системи рівнянь (2.1) відносно масової радіальної швидкості руху  $u$ . Найбільший практичний інтерес

представляє воно в момент досягнення ударною хвилею (УХ) межі ВР «продукти детонації – середовище»:

$$u_R(h) = D \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{h}{R} \right)^\alpha \right]^\beta \right\} \quad (4.2)$$

де  $D$  – швидкість розповсюдження детонації;  $R$  – радіус заряду;  $\alpha = 1,05$ ;  $\beta = 0,67$  ( $2/3$ ).

Знаючи величину  $u(h)$  в будь-який попередній момент часу, (а для цього замість  $R$  в (2.2) підставляється довільне менше значення радіусу ударної хвилі), визначаємо поле переміщень  $S(h)$  і поле щільності  $\rho_R(h)$ . Потім, використовуючи взаємозв'язок координат Лагранжа і Ейлера ( $r = h + S(h)$ ), де  $r$  - координата Ейлера, перераховуємо розподіл масових швидкостей і щільності в координатах Ейлера. Результати наведені в таблиці 4.1.

Дані таблиці 4.1 дозволяють оцінити питому кількість руху, що виникає при вибуху в середовищі [102]:

$$\begin{aligned} \frac{\int_0^R \rho_0 u h d h}{R} &= \rho_0 u(R) R \int_0^1 \frac{u}{u(R)} \cdot \frac{h}{R} \cdot \alpha \left( \frac{h}{R} \right) = 0,263 \rho_0 u(R) R \\ &= 0,197 \rho_0 D R \end{aligned} \quad (4.3)$$

Реальний розподіл вище наведених параметрів детонаційної хвилі відрізняються тим, що:

- ударний фронт є косим, оскільки хвиля детонації поширюється не тільки в радіальному, але і в поздовжньому напрямку;
- швидкість детонації не є постійною, принаймні по радіусу, оскільки зовнішня плазма реакції вибухового розкладання чутливо реагує на зниження дії краю [103];
- наявність неоднорідності призводить до спотворення стаціонарного поширення реакції, зокрема, до поздовжніх пульсацій, що не пов'язані з характером ініціюючого імпульсу [104].

Таблиця 4.1 – Розподіл масових швидкостей і щільності в умовах стаціонарної детонації при осьовому ініціюванні

$h/R$	$r/R$	$\rho/\rho_o$	$U/U(R)$
0,05	0,1510	0,137	0,50289
0,10	0,2605	0,191	0,0604
0,15	0,3523	0,247	0,0932
0,20	0,4330	0,304	0,1272
0,25	0,5051	0,362	0,1624
0,30	0,5700	0,427	0,1986
0,35	0,6288	0,497	0,2360
0,40	0,8622	0,577	0,2747
0,45	0,7306	0,668	0,3146
0,50	0,7746	0,772	0,3560
0,55	0,8143	0,898	0,3989
0,60	0,8500	1,046	0,4437
0,65	0,8819	1,228	0,4905
0,70	0,9101	1,457	0,5398
0,75	0,9347	1,756	0,5921
0,80	0,9558	2,168	0,6481
0,85	0,9732	2,817	0,7093
0,90	0,9867	3,932	0,7780
0,95	0,9961	7,171	0,8600
0,97	0,9979	9,258	0,9004
0,99	0,9997	20,674	0,9521

Оскільки практичний досвід даних досліджень зроблено на основі багатокомпонентних грубо дисперсних ВР, що уявляють собою гетерогенне середовище, викладемо сучасне уявлення про нестаціонарне вибухове перетворення в цих, порівняно слабких вибухових композиціях, ґрунтуючись на [105].

Якщо адіабатичне охолодження в хвилі розрідження перевищує самий розігрів ВР за рахунок протікання реакції, остання припиняється, що описується умовою [106]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{TV}}{Cv} \cdot \frac{dk}{dt} + \left( \frac{dT}{dv} \right)_{s,k} \frac{dv}{dt} < 0 \quad (4.4)$$

де  $Q_{TV}$  – тепловий ефект реакції при постійній температурі  $T$  та об’ємі  $v$ ;  $k$  – частка прореагованої речовини,  $Cv$  – теплоємність при постійному об’ємі.



Відомо [107], що нормальна детонація завжди виникає з перетиснутого режиму. Якщо при переході перетиснутої детонаційної хвилі в нормальний режим хімічна реакція на фронті ударної хвилі затухає, то хвиля в нормальному режимі носить нестійкий фронт. Затухання хімічної реакції означає зменшення хімічного піку ПД. Вона діє як поршень, рухаючи в початкове положення ВР ударну хвилю, що призводить до виникнення на їхній поверхні шару ударної стиснутої ВР (УВР). Швидкість затухання в ударній хвилі менше, ніж на хімічному піці, тому саме затухання може долатися за рахунок реакції в УВР у вигляді адіабатичного теплового вибуху (АТВ) і хімічна реакція може виникнути знову.

Таким чином, хімічна реакція на фронті детонаційної хвилі низькошвидкісних ВР може піддаватися подальшій реанімації. У ВР з досить нестійким фронтом реакція при всіх тисках ударного стиснення знизу (аж до детонаційних) розвивається за законами «повільної» кінетики. Тому утворення АТВ на межі розподілу ПД – УВР призводить до практично миттєвого виникнення детонації УВР, яка рухається навздогін в напрямку фронту ударної хвилі. При цьому тиск детонації УВР значно перевищує тиск на хімічному піці, тобто УВР детонує в значно перестиснутому режимі. При виході з цього режиму реакція знову починає затухати, виникає новий шар УВР і т. д.

За рахунок неоднорідності компонентного складу, флуктуації температури і інших причин АТВ в УВР виникає не одночасно по всій поверхні межі розподілу ПД – УВР, а хаотично. Півсфери, що утворюються внаслідок АТВ наздоганяють фронт ударної хвилі, утворюючи при цьому в початковій ВР сильно перестиснуті детонаційні хвилі.

Слід зазначити, що незважаючи на можливу відсутність вибухового тепловиділення в ударному стрибку виникає значно невірноважений стан речовини. Відсутність на даний час відомостей про ударно-хвильову кінетику не дозволяє дати обґрунтовану кількісну оцінку описуваних явищ, тому на даний час найбільш надійна джерелом отримання кількісних результатів - експеримент і його феноменологічна інтерпретація.

Зважаючи на складність процесу вибухового перетворення параметри початкового імпульсу, що діє у зовнішньому середовищі, відчують також певні коливання, навіть у випадку, коли має місце стабільність усереднених в часі характеристик зазначеного перетворення.

Однак в цьому, найбільш цікавому з практичної точки зору випадку, при дії вибуху у зовнішньому пасивному середовищі доцільно ввести усереднені параметри: середня амплітуда тиску, середній час зростання, середній час спадання і т.д. З метою розпізнавання такого роду параметрів від справжніх будемо позначати їх з нижній індексом «m» (від слова medial - середній).

Через неможливість забезпечення при заряджанні між ВР і зовнішнім середовищем щільного контакту, тобто на межі ВР – середовище завжди присутні повітряні проміжки, по яким попереду фронту ударної хвилі поширюється зовнішня плазма і, таким чином, зростання реального зовнішнього тиску вже на контакті здійснюється не стрибком, а за час, що вимірюється в мікросекундах.

На рисунку 4.1 схематично показано поверхню ударного фронту (пунктиром) і поверхню контакту (суцільна лінія). Якщо в момент часу  $t_0$  край фронту досягне точки В, то в момент часу  $t_1 = t_0 + \Delta t$  в точці А почне зростати тиск, де  $\Delta t$  - час передачі сигналу про вибухову хвилю зовнішньою плазмою. Цей сигнал є деякою інтегральною функцією імпульсу ВР в деякій точці В і досягає максимуму не обов'язково в момент приходу ударної хвилі.

Якщо припустити, що передача сигналу про імпульс в точці В в точку А здійснюється після початку з деякою, приблизно постійною швидкістю, яка дещо перевищує швидкість поширення ударної хвилі, то можна оцінити тривалість зростання переднього фронту хвилі. З цією метою виділимо в заряді ВР переріз, на якому щільність суміші ПД – ВР відповідає вихідній.

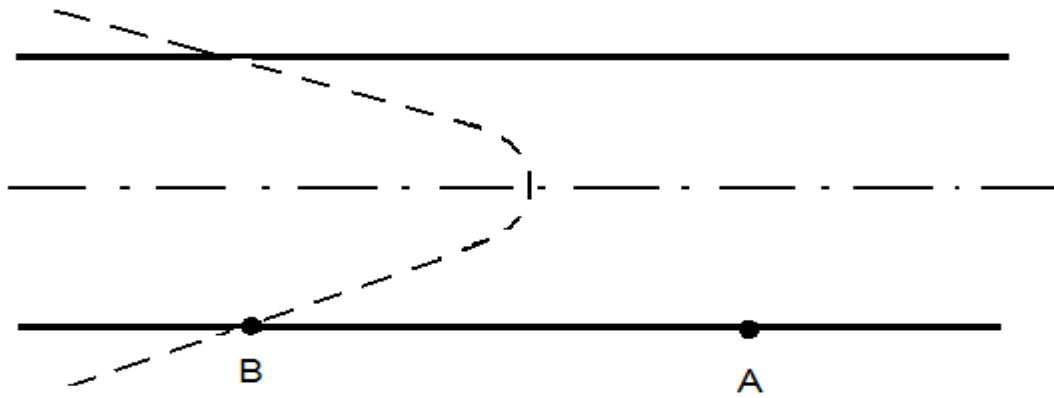


Рисунок 4.1 – Схема розповсюдження ударного фронту

Для випадку стаціонарної радіальної детонації такий переріз віддалений від осі заряду на відстань, що становить  $0,6 R$ . У момент, коли вказаний переріз досягне точки В, а хвиля розрідження досягне контактної поверхні, подальше «підживлення» імпульсу в точці А припиниться. Позначимо цей момент часу  $t_l$ . Отже, в точці А імпульс досягне максимуму в момент часу, що становить  $t_\zeta = t_l + \Delta t$ .

Для випадку радикального ініціювання

$$t_3 - t_1 = t_2 - t_1 = \frac{0,4R}{U_m} \approx 0,533 \frac{R}{D} \quad (4.5)$$

Насправді вказана радіальна компонента масової швидкості в силу того, що ударний фронт є косим, менше ніж  $0,75 D$ , а товщина ущільненого шару ВР в рамках його початкового об'єму з тієї ж причини дещо менша.

Слід зазначити, що величина  $\Delta t$  також не постійна. Але, для грубої оцінки часу зростання імпульсу на контакті ВР (ПД) – зовнішнє середовище формула (2.5) може бути використана.

Що ж стосується оцінки амплітуди тиску  $P_m$  і тривалості спаду імпульсу  $t_{y.m}$ , то для їх оцінки скористаємося [108], де враховуються як характеристики ВР, так і зовнішнього середовища.

Інтенсивна вибухова хвиля, яка генерується за допомогою вибуху, поширюється в масиві і супроводжується руйнуванням породи і метанням окремоностей. На жаль, на даний час в літературі з цих питань відсутня достатня

інформація, яка б в достатній мірі, як відображала уявлення протікання даних явищ, так і надала можливість до простих інженерних рішень.

Найбільш розповсюджене припущення - ігнорується в'язкість механізму руйнування і, як наслідок, до уваги береться тривалість впливу позитивної та негативної фаз вибухової хвилі. Наведена нижче схематизація дозволяє повністю усунути зазначені якісні недоліки, а також врахувати зміну тривалості хвилі на різних відстанях [109]:

1. Всякому акту руйнування передуює проходження хвилі, епіюра нормальних напружень в якій, досить точно відображається функцією типового сигналу:

$$\sigma_{n,m}(t) = A \cdot e^{-\lambda t} \sin \mu(t - t^*) \quad (4.6)$$

де  $t^*$  – момент приходу хвилі у відповідний елемент,  $A$  – амплітуда за відсутності в'язких властивостей ( $\lambda=0$ ),  $\lambda$  – декремент затухання, обумовлений релаксацією напружень,  $\mu$  – основний частотний параметр;

2. До моменту руйнування середовище є практично пружною (з незначною в'язкістю). Тому можливість бічного розпору характеризується значеннями коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , а бічне напруження визначається співвідношенням:

$$\sigma_B = \sigma_n \cdot \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (4.7)$$

3. Впливом відколу на процес подальшого поширення хвилі (до входу її на вільну поверхню) нехтуємо. Це цілком припустимо, з огляду на те, що природна тріщинуватість корелюється з в'язкими властивостями і «хвіст» імпульсу не робить помітного впливу на передню частину в більш далеких зонах розповсюдження хвилі.

4. Довговічність (час до настання етапу руйнування) визначається із співвідношення, що дозволяє узагальнити як термофлуктуаційну теорію (відкол при розриві), так і лінеарізійну концепцію теорії Кулона:

$$\tau = \alpha \cdot \exp\{\gamma \sigma_B - \delta \sigma_n\} \quad (4.8)$$

де  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  - коефіцієнти, що визначаються властивостями матеріалу (грунту).

Умови руйнування при довільних (непостійних) значеннях зовнішніх напружень визначаються за допомогою інтеграла накопичення пошкоджуваності Бейлі:

$$\int_{t^*}^t \frac{dt'}{\tau(t')} \geq 1 \quad (4.9)$$

Розрахунок параметрів заломлених і відбитих на межах твердих середовищ хвиль помірної інтенсивності (до декількох тисяч атмосфер) проводиться відповідно до акустичного (лінійно пружного) наближення:

$$p' = \frac{2\rho\sqrt{\rho\rho'c'} \cdot \sqrt{c^2 - c'^2\cos^2\nu}}{\rho'c' \sin \nu + \rho\sqrt{c^2 - c'^2\cos^2\nu}} \quad (4.10)$$

$$\tilde{p} = p \frac{\rho'c' \sin \nu - \rho\sqrt{c^2 - c'^2\cos^2\nu}}{\rho'c' \sin \nu + \rho\sqrt{c^2 - c'^2\cos^2\nu}} \quad (4.11)$$

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{p}}{\rho c} \quad (4.12)$$

де  $p, p', \tilde{p}$  – відповідно, параметри тиску в падаючій, заломленій і відбитій хвилях, Па;  $\nu$  – масова швидкість відображеної хвилі, м/с;  $\rho, \rho'$  – відповідно, щільність в першій і другий середовищах, кг/м<sup>3</sup>;  $c, c'$  – відповідні параметри швидкостей розповсюдження коливань, м/с;  $\nu$  – кут між вектором розповсюдження хвилі і дотичною площиною до поверхні контакту.

#### **4.2 Теоретичний розрахунок параметрів вибухового імпульсу на межі розподілу ВР – ґрунтовий масив**

Підвищення об'ємної концентрації енергії заряду шляхом збільшення щільності ВР призводить до зростання пікового тиску детонації, що в ряді випадків знижує коефіцієнт корисного використання енергії вибухового перетворення через великі втрати в ближній зоні дії вибуху [110].

При дослідженні параметрів вибухового імпульсу для ущільнення територій просадних ґрунтів за рахунок поверхневих або горизонтальних циліндричних

зарядів вибухових речовин вимагається обмеження бризантної дії зарядів вибухових речовин. Цього можна досягти за рахунок застосування малошільних вибухових сумішей, спінених вибухових композицій, обробкою їх ультразвуковим випромінюванням, тощо.

Аналіз попередніх досліджень при вирішенні задачі знаходження радіусу зони ущільнення ґрунтів навколо свердловини [111–117] малошільними спіненими композиціями показав, що необхідним є визначення тиску на їх контакті «продукти детонації – середовище». Ґрунтуючись на численних експериментальних даних дослідники вважають, що ефективність ущільнення просадних ґрунтів при застосуванні вибуху визначається не тільки максимальним тиском на фронті детонаційної хвилі, але і тривалістю вибухового імпульсу. Це проявляється у збільшенні загальних форм роботи вибуху на великих відстанях від заряду, а відповідно в покращенні ущільнення ґрунтового масиву на значній відстані.

У зв'язку з цим необхідно дослідити взаємозв'язок ефективності вибухових речовин (ігданіт, амоніт №6 ЖВ) і спіненої вибухової композиції як звичайної, так і після обробки ультразвуковим випромінюванням (ПАР з УЗ) для ущільнення просадних водонасичених ґрунтів з максимальним тиском, тривалістю і формою вибухового імпульсу, який виникає на межі «продукти детонації - середовище». При розрахунках вибухового імпульсу штатних вибухових речовин (ігданіт, амоніт №6 ЖВ) і спінених вибухових композицій з обробкою ультразвуковим випромінюванням та без, використовувалася методика, розроблена Н. Н. Козаковим [108, 110].

При виході детонаційної хвилі на межу розподілу «продукти детонації - середовище» виникає ударна хвиля, початковий тиск якої визначається рішенням системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_H = \sqrt{(P_{max} - P_0) \cdot (v_0 - v)} \\ P_{max} = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right] \\ U_H = \frac{D}{K+1} \left( 1 - \sqrt{2K} \frac{\frac{P_{max}-1}{2P_{cp}}}{\sqrt{(K+1)\frac{P_{max}}{2P_{cp}} + (K-1)}} \right) \\ U_H = \frac{D}{K+1} \left\{ 1 + \frac{2K}{K-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{max}}{2P_{cp}} \right)^{\frac{K-1}{2K}} \right] \right\} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{при } P_{max} > P_{cp} \\ \text{при } P_{max} < 2P_{cp} \end{array} \quad (4.13)$$

де  $P_{max}$  – початковий тиск на фронті ударної хвилі;  $v_0 = \frac{1}{\rho_0}$  – питомий об'єм незбуреного середовища;  $v = \frac{1}{\rho}$  – питомий об'єм середовища на фронті ударної хвилі;  $D$  – швидкість детонації;  $P_{cp}$  – тиск в свердловині за умови миттєвої детонації.

$$P_{cp} = (k - 1)\rho_0'Q_v \quad (4.14)$$

де  $Q_v = 427 \cdot Q \cdot g$  – теплота вибуху одиниці маси ВР;  $Q$  – теплота вибуху ВР;  $g = 9.81 \text{ Н/м}^2$  – прискорення сил тяжіння;  $k = 3$  – показник ізоентропи при переушільненому стані продуктів детонації.

$$B = \frac{\rho c^2}{n} \quad (4.15)$$

де  $\rho$  – щільність середовища;  $c$  – швидкість вибухової ударної хвилі, в твердому середовищі приймається рівною швидкості звуку в незбуреному середовищі.

В умовах реальної детонації тиск на межі розподілу «продукти детонації–середовище» описується наступними залежностями.

$$\begin{aligned} P_r &= \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \left[ \left( P_{max} \frac{r''' - r}{r'' - r_0} \right) + P_{min} \left( 1 - \frac{r''' - r}{r''' - r_0} \right) \right] && \text{при } r_0 < r < r''' \\ P_r &= \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \left[ \left( P_{min} \frac{r'' - r}{r'' - r'''} \right) + P_{сep} \left( 1 - \frac{r'' - r}{r'' - r'''} \right) \right] && \text{при } r''' < r < r'' \\ P_r &= P_{сep} \left(\frac{r_0}{r}\right)^6 && \text{при } r'' < r < r' \\ P_r &= P_r' \left(\frac{r'}{r}\right)^{2\gamma} && \text{при } r > r' \end{aligned} \quad (4.16)$$

де  $r''$  – положення межі розподілу, на якій тиск за рахунок вирівнювання досягає мінімуму;  $r_0$  – радіус заряду;  $r$  – радіус межі розподілу «продукти детонації - середовище»;  $\gamma$  – показник ізентропи ідеального газу, який становить  $\gamma = 1,3$

Невідомі величини  $P$ ,  $r''$  і  $r'''$  визначаються з співвідношень:

$$P_{min} = 1.4P_{сp} - 0.4P_{max} \quad (4.17)$$

$$r''' = r_0 \left( 1 - K_1 \frac{U_H}{D} \right)$$

$$r'' = r_0 \left( 1 + K_2 \frac{U_H}{D} \right)$$

де  $K_1 = 0.6$ ;  $K_2 = 1.7 \div 2.5$  – безрозмірні коефіцієнти.

Ділянку шляху від  $r_0$  до  $r'''$  межа розподілу пройде за час

$$t_1 = 0,64 \frac{r_0}{D} \quad (4.18)$$

а ділянку шляху  $r''' - r''$  – відповідно за час

$$t_2 = \frac{1,2r_0 + 2r''}{D} \quad (4.19)$$

При цьому тиск  $P_r$  становитиме: в момент часу  $t_1$ :

$$P_r = P_{min} \left( \frac{r_0}{r'''} \right)^6 \quad (4.20)$$

в момент часу  $t_2$ :

$$P_r = P_{cp} \left( \frac{r_0}{r''} \right)^6 \quad (4.21)$$

а при  $t = 0$ :

$$P_r = P_{max}$$

Графік залежності  $P_r$  від  $t$  апроксимується залежністю:

$$P = P_0 e^{-\alpha t} \quad (4.22)$$

де  $\alpha$  – логарифмічний декремент загасання, що залежить від властивостей середовища. Коефіцієнти  $P_0$  і  $\alpha$  знаходяться з рівнянь:

при  $t=0$

$$P = P_0 = P_{max}$$

при  $t=t_1$

$$P_r' = P_{min} \left( \frac{r_0}{r'''} \right)^6 \quad (4.23)$$



Звідси отримуємо:

$$\alpha = \frac{l_n P_{max} - l_n P_r'}{t_1} \quad (4.24)$$

Час зростання вибухового імпульсу визначається за формулою:

$$\tau = \frac{0.4r_0}{3/4 D} \quad (4.25)$$

Користуючись основними співвідношеннями, наведеними вище, проведений розрахунок параметрів вибухового імпульсу для різних ВР від вибуху зарядів радіусом 30 мм в супісках. Основні вихідні дані наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Фізичні і динамічні характеристики ВР

Найменування	Показники			
	амоніт №6ЖВ	Ігданіт	спінена ВР	спінена ВР, оброблена УЗ
Щільність ВР, $\rho_0$ г/см <sup>3</sup>	0,8	0,8	0,6	0,5
Швидкість детонації $D$ , м/с	3700	3450	1500	1500
Теплота вибуху $Q$ , ккал/кг	1030	870	850	840
Щільність середовища $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2800	2800	2800	2800
Швидкість розповсюдження ударної хвилі, $c$ м/с	4950	4950	4950	4950
Радіус заряду, $r_0$ , м	0,03-0,09	0,03-0,09	0,03-0,09	0,03-0,09

Як приклад, наведемо розрахунок параметрів вибухового імпульсу для амоніту №6ЖВ:

$$P_{cp} = Q_v \rho_0 (K - 1) = 427 \cdot 1030 \cdot 800 \cdot 2 \cdot 9.8 = 6.89 \cdot 10^9, \text{ Н/м}^2$$

$$B = \frac{\rho c^2}{4} = \frac{2.8 \cdot 10^3 (4.95 \cdot 10^3)^2}{4} = 17.15 \cdot 10^9, \text{ Н/м}^2$$

Вирішуючи рівняння (4.13 – 4.21), знаходимо:

$$P_{max} = 8.19 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$$

$$U_n = 1370 \text{ М/с}$$

$$P_{min} = 1.4P_{cp} - 0.4P_{max} = 6.37 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$$

$$t_1 = 0.64 \frac{r_0}{D} = \frac{0.64 \cdot 0.03}{3700} = 5.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$r''' = r_0 \left( 1 + K_1 \frac{U}{D} \right) = 0.03 \left( 1 + 0.6 \frac{1370}{3700} \right) = 0.0367 \text{ мм}$$

$$r'' = r_0 \left( 1 + K_2 \frac{U}{D} \right) = 0.03 \left( 1 + 2.1 \frac{1370}{3700} \right) = 0.0533 \text{ мм}$$

$$t_2 = \frac{1.2r_0 + 2r''}{D} = \frac{1.2 \cdot 0.03 + 2 \cdot 0.0533}{3700} = 38.5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$\text{при } t=0 \quad P_r = P_{max} = 8.19 \cdot 10^9 \text{ , Н/м}^2$$

$$\text{при } t=t_1 \quad P_r' = \left( \frac{r_0}{r'''} \right)^6 P_{min} = \left( \frac{0.03}{0.0367} \right)^6 \cdot 6.37 \cdot 10^9 = 1.9 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$$

$$\text{при } t=t_2 \quad P_r = \left( \frac{r_0}{r''} \right)^6 P_{cp} = \left( \frac{0.03}{0.0533} \right)^6 \cdot 6.89 \cdot 10^9 = 0.22 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$$

$$\alpha = \frac{\ln P_{max} - \ln P_r'}{t_1} = \frac{\ln(8.19 \cdot 10^9) - \ln(1.9 \cdot 10^9)}{(5.1 \cdot 10^{-6})} = 2.86 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$$

$$\tau = \frac{0.4r_0}{\frac{3}{4} D} = 4.3 \text{ мкс}$$

Розрахунки за даною методикою для амоніту не враховують ширину зони хімічної реакції, тому не можуть з достатньою точністю описувати процес наростання тиску на межі розподілу, що відбувається під час вибуху ВР з широкою зоною реакції, якими є ігданіт і спінені ВР. У цих ВР зростання тиску на межі розподілу відбувається не стрибком, а поступово, від нуля до максимального значення за час походження детонаційною хвилею ділянки, рівної ширині зони хімічної реакції.

Зміна тиску на межі розподілу визначається за формулою:

$$P_r = \frac{P' D t}{b} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{2k} \quad \text{при } 0 < t < t' \quad (4.26)$$

де  $P'$  – початковий тиск на межі розподілу, що визначається за методикою, викладеною вище;  $D$  – швидкість детонації;  $t$  – час;  $b$  – ширина зони хімічної реакції;  $r_0$  – радіус заряду;  $r$  – радіус свердловини;  $t'$  – час наростання пікового тиску.

З огляду на це розраховані параметри вибухового імпульсу на межі розподілу при підриванні зарядів ігданіту і спіненої ВР.

Рішення цієї задачі в інтервалі часу від  $0$  до  $t'$  зводилося до вирішення диференціального рівняння:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{2r(P_r - P_0) - 2\rho_0 c R \bar{U}}{\rho'_0 \cdot r_0^2 + \rho_0(R^2 - r_0^2)} \quad (4.27)$$

де  $\bar{U}$  – середня швидкість середньої маси;  $P_0$  – атмосферний тиск;  $R$  – радіус фронту хвилі збудження.

За даними розрахунків таблиці 4.3 на рисунку 4.2 графічно наведено вибухові імпульси для амоніту №6 ЖВ, ігданіту та спіненої ВР при підриванні зарядів ВР радіусом 30 мм у просадних лесових ґрунтах. На рисунку 4.3 наведено час зростання вибухового імпульсу наведених ВР.

Таблиця 4.3 – Розрахункові параметри вибухового імпульсу ВР

Найменування		Показники			
		амоніт №6 ЖВ	ігданіт	спінена ВР	спінена ВР з УЗ
Початковий тиск на фронті уданої хвилі, $P_{max} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		8,19	6,92	5,52	4,18
Тиск в свердловині, за умови миттєвої детонації, $P_{сер} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		6,89	5,82	4,27	3,25
Мінімальний тиск, $P_{min} \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		6,37	5,38	3,77	3,26
Тиск в момент часу $t_1$ , $P_r \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		1,9	1,76	0,31	0,4
Тиск в момент часу $t_2$ , $P_r \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$		0,22	0,24	0,009	0,016
Час проходження ділянки від $r^0$ до $r'''$ , $t_1$ , $\cdot 10^{-6} \text{ с}$		5,1	5,57	12,8	12,8
Час проходження ділянки від $r'''$ до $r''$ , $t_2$ , $\cdot 10^{-6} \text{ с}$		38,5	39,94	135,4	122,3
Час зростання вибухового імпульсу, мкс при:	$r_0=0,03 \text{ м}$	4,3	4,6	10,6	10,6
	$r_0=0,06 \text{ м}$	8,65	9,28	21,33	21,33
	$r_0=0,09 \text{ м}$	12,97	13,91	32,0	32,0

Як видно з рисунку 4.2, у зарядах на основі спінених ВР головна частина вибухового імпульсу має мінімальне пікове значення тиску і максимальну тривалість, як для ВР з найменшою швидкістю детонації і найбільшою шириною зони хімічної реакції. При цьому тиск спіненої ВР після обробки ультразвуковим випромінюванням дещо менший, ніж у звичайної спіненої ВР, але при цьому менша тривалість вибухового імпульсу.

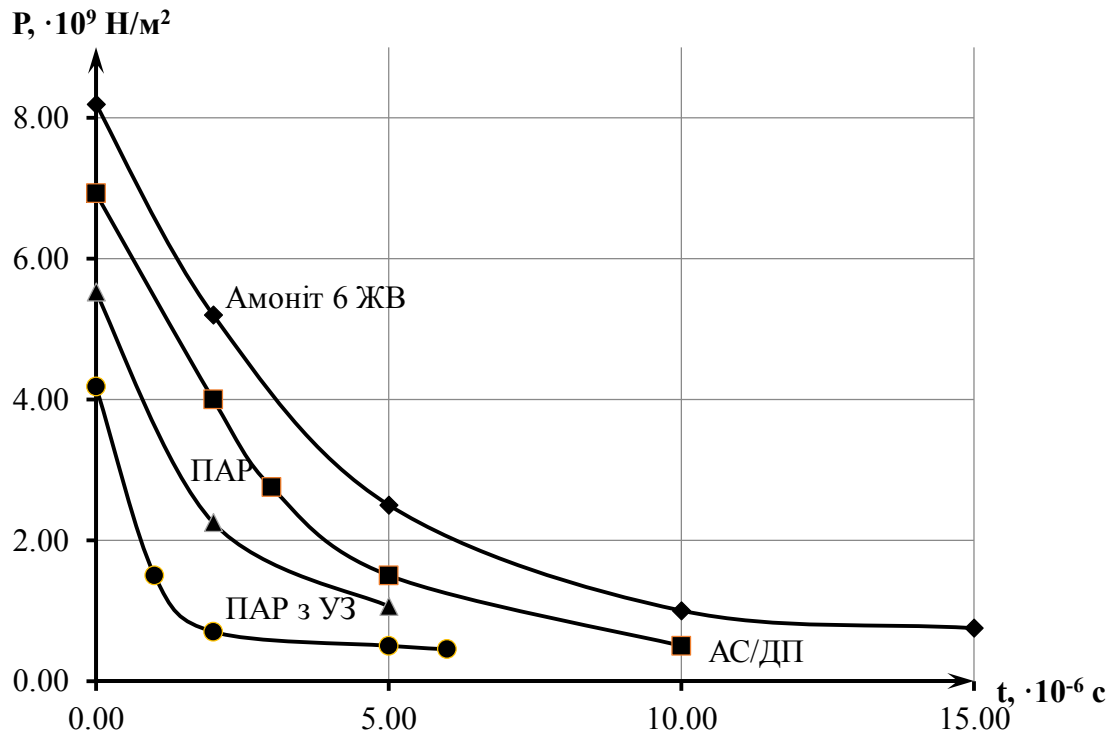


Рисунок 4.2 – Залежність тиску на межі розподілу «продукти детонації – середовище» від часу

Аналіз теоретичних досліджень свідчить, що максимальний тиск спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, становить  $4,18 \cdot 10^{-9} \text{ Н/м}^2$ , що на 49 % менше порівняно з амонітом №6 ЖВ і на 40 % менше порівняно з ігданітом. Для звичайної спіненої ВР максимальний тиск становить  $5,52 \cdot 10^{-9} \text{ Н/м}^2$ , що на 33% менше порівняно з амонітом №6 ЖВ і на 20 % порівняно з ігданітом. При цьому максимальна тривалість вибухового імпульсу на межі «продукти детонації – середовище» для спіненої ВР, обробленої ультразвуковим випромінюванням, становить  $122,3,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , тобто в 3,2 рази більша порівняно з амонітом №6 ЖВ і в 3 рази більша порівняно з ігданітом. Для звичайної спіненої ВР максимальна тривалість вибухового імпульсу становить  $135,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , що в 3,5 рази більша порівняно з амонітом №6 ЖВ і в 3,37 рази більша порівняно з ігданітом.

Аналогічна закономірність спостерігається і при дослідженні тривалості зростання вибухового імпульсу, яка для спінених ВР, як звичайних, так і після

обробки ультразвуковим випромінюванням знаходиться в межах від 10,6 мкс до 32 мкс. Для амоніту №6 ЖВ цей параметр становить – від 4,3 мкс до 12,97 мкс, для ігданіту – від 4,6 мкс до 13,91 мкс.

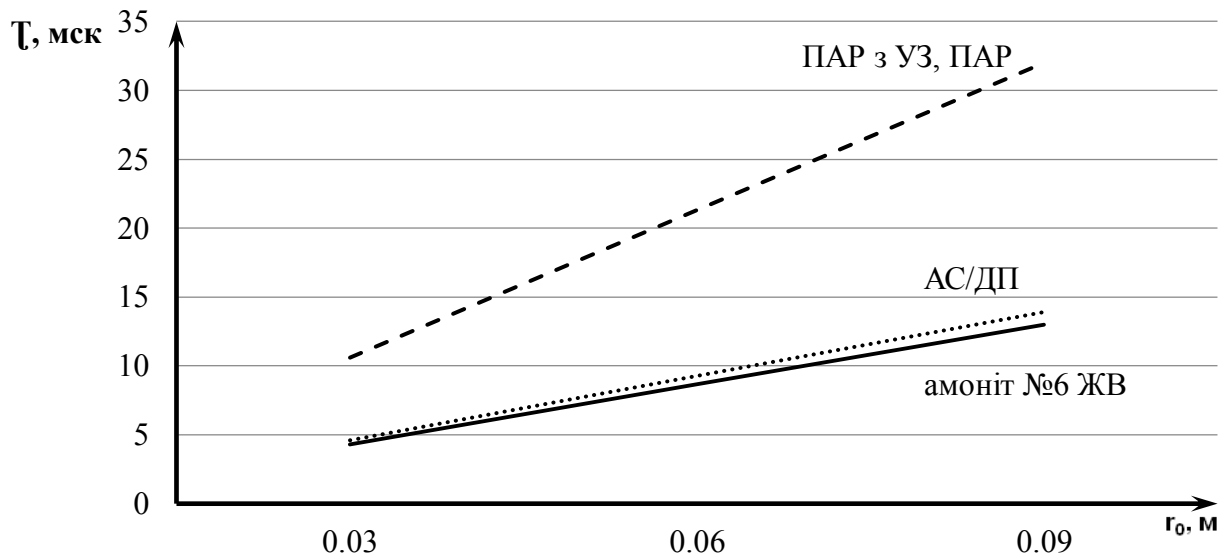


Рисунок 4.3 – Залежність тривалості зростання вибухового імпульсу від радіусу заряду ВР

Структурно-нестійкі ґрунти при природній вологості є достатньо міцними основами. Їм властива мала стискаємість з модулем деформації 20 – 50 МПа і більше. При замочуванні різко погіршуються їх первісні властивості, і вони стають просадними. Зі збільшенням вологості модуль деформації зменшується до 3-5 МПа, а іноді і до 1 МПа. Тому розроблені вище способи керування параметрами малощільних ВР дозволяють визначити характер ущільнення структурно-нестійких просадних ґрунтів в залежності від їх стану та обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення територій цих ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Останні мають перспективу широкого застосування при будівництві промислових і житлових об'єктів в областях України таких як Дніпропетровська, Запорізька, Ніколаївська й інших, території яких покриті шаром структурно-нестійких ґрунтів у вигляді лесів.

Отже, дані теоретичних розрахунків свідчать про те, що найбільшого ефекту при ущільненні просадних ґрунтів можна досягти за рахунок застосування спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням, які при мінімальному значенні тиску на межі «продукт детонації – середовище» мають значну тривалість вибухового імпульсу, що в свою чергу має сприяти рівномірному ущільненню просадних ґрунтів на необхідну товщу.

#### 4.3 Результати математичного моделювання розповсюдження вибухових хвиль малощільних ВР в ґрунтовому масиві

Розрахунки проводилися для суглинків з наступними фізичними характеристиками (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Основні фізичні характеристики відібраних зразків лесового ґрунту

№ з/п	Щільність ґрунту	Природна вологість	Щільність скелету ґрунту	Вологість на межі текучості	Вологість на межі розкочування	Число пластичності	Показник текучості	Щільність мінеральних часток	Коефіцієнт пористості
	$\rho_0$ г/см <sup>3</sup>	$w_e$ , д. од.	$\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	$W_l$ , д. од.	$W_p$ , д. од.	$I_p$	$I_l$	$\rho_s$ г/см <sup>3</sup>	$e$
1	1,55	0,137	1,36	0,24	0,20	0,04	$\leq 0$	2,63	0,934
2	1,77	0,143	1,55	0,26	0,22	0,04	$\leq 0$	2,68	0,729

Кут внутрішнього тертя ( $\phi$ , град) – 19, питоме зчеплення ( $c$ , МПа) – 0,043, модуль деформації ( $E$ , МПа) – 6,48 у природному стані та 2,41 у водонасиченому стані, коефіцієнт Пуассона ( $\mu$ ) – 0,35.

Фізико – механічні характеристики суглинку згідно моделі твердого пористого багатокомпонентного середовища наступні:  $\rho_{20} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{20} = 1500$ ,  $c_{30} = 4500$  М/с,  $\gamma_2 = 7$ ,  $\gamma_3 = 4$ ;  $\rho_0 c_S^2 = 3 \cdot 10^6$ ,  $\rho_0 c_D^2 = 1.2 \cdot 10^7$ ,  $\rho_0 c_{SR}^2 = 3 \cdot 10^6$  Па;  $m = 3$ ;  $k = -1.5 \cdot 10^7$  Па;  $\gamma_S = 6$ ;  $\gamma_D = 7$ ;  $\gamma_{SR} = 7$ ;  $\eta_D = 200$

$Па \cdot c$ .

Для ґрунту №1  $\rho_0 = 1550 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{30} = 2630 \text{ кг/м}^3$ ;  $\alpha_1=0.26$ ,  $\alpha_2=0.24$ ,  $\alpha_3 = 0.5$ .

Для ґрунту №2  $\rho_0 = 1770 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{30} = 2680 \text{ кг/м}^3$ ;  $\alpha_1=0.18$ ,  $\alpha_2=0.26$ ,  $\alpha_3 = 0.56$ .

Розглядався вибух заряду радіусом  $r_0 = 0,09 \text{ м}$ .

Компонентний склад малошільних ВР та ігданіту наведено в таблиці 4.5, а їх динамічні характеристики – в таблиці 4.6 (розраховані за методикою [118-123]).

Таблиця 4.5 – Компонентний склад ігданіту та малошільних ВР

№ п/п	Компоненти ВР	Ігданіт	Малошільна ВР АС/СФ/АП
1	Аміачна селітра	94,5	90
2	Дизельне паливо	5,5	–
3	Сульфонал – порошок	–	6
4	Алюмінієва пудра	–	4

Таблиця 4.6 – Динамічні характеристики сумішевих ВР

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР		
			Ігданіт АС/ДТ	Спінена ВР	Спінена ВР, оброблена УЗ
1	Щільність ВР, $\rho_0$ ,	г/см <sup>3</sup>	0,85	0,6	0,5
2	Швидкість детонації: $D$ , відкритий заряд	10 <sup>3</sup> м/с	3450	1500	1500
3	Теплота вибуху $Q$	ккал/кг	870	1500	1500
2	Бризантність ВР	10 <sup>-3</sup> м	15-20	9-11	9-11
4	Час зростання тиску в імпульсі	10 <sup>-6</sup> с	30	43	48
5	Тиск на фронті хвилі	10 <sup>9</sup> Па	2,0	0.95	0,85
6	Швидкість зростання тиску	10 <sup>14</sup> Па/с	0,5-0,8	0.22	0,18
7	Показник політропи, $N$		4.41	2.24	2.12
8	Показник ізентропи, $\gamma$		0,264	0,235	0,212

На рисунку 4.4 представлені залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) суглинку на межі з вибуховою порожниною при вибуху ігданіту (1), спіненої ВР (2).

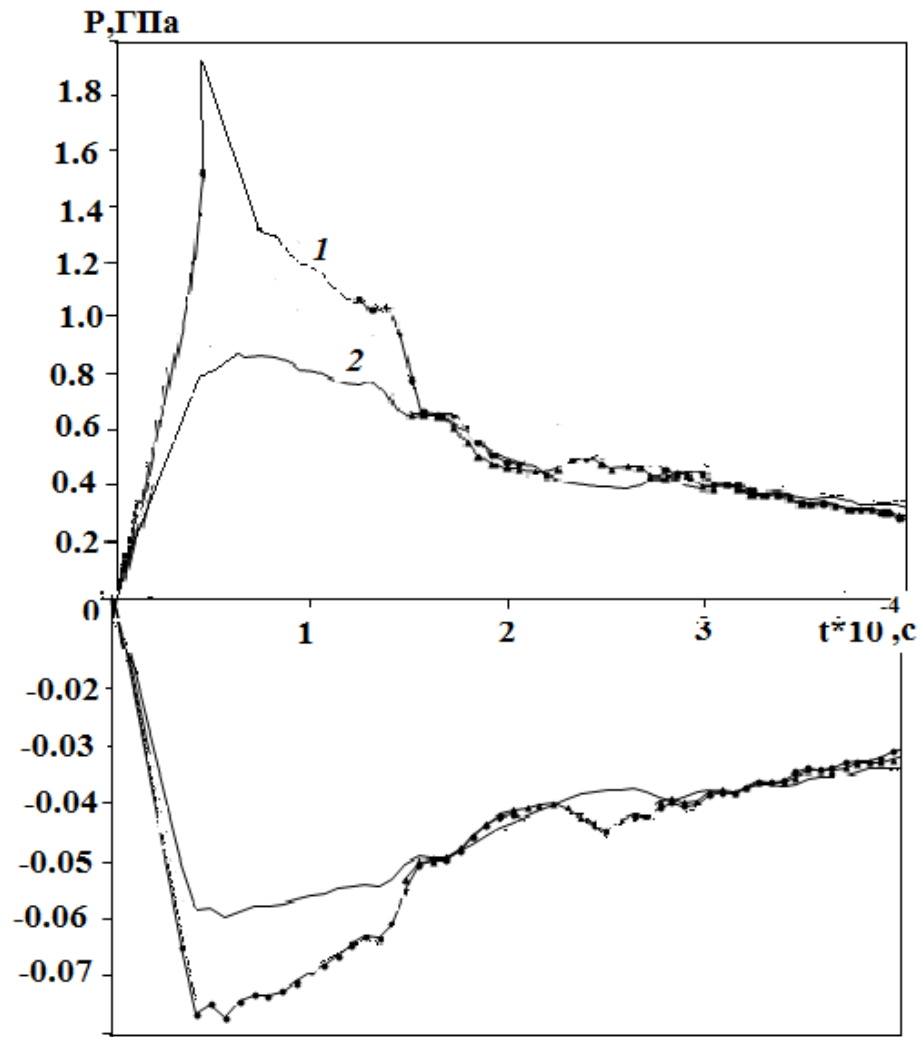


Рисунок 4.4 – Залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) лесового ґрунту від часу на границі в вибуховій порожнині під час вибуху: 1 – ігданіту, 2 – спіненої ВР

З рисунку видно, що на границі з порожниною при вибуху заряду ігданіту досягаються значно більші значення гідростатичного тиску та максимальної об'ємної деформації, ніж при вибуху спіненої ВР. Це пояснюється більш високими детонаційними характеристиками ігданіту: щільністю, тиском в точці Жуге. Час досягнення максимумів тиску та деформації при вибуху ігданіту значно менший, тому що і швидкість детонації у ігданіту вища, ніж у спінених ВР.

На рисунку 4.5 та 4.6 представлені залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) в суглинках № 1 (рисунок 2.5) і №2 (рисунок



2.6) на відносній відстані  $r = r / r_0 = 15.07$

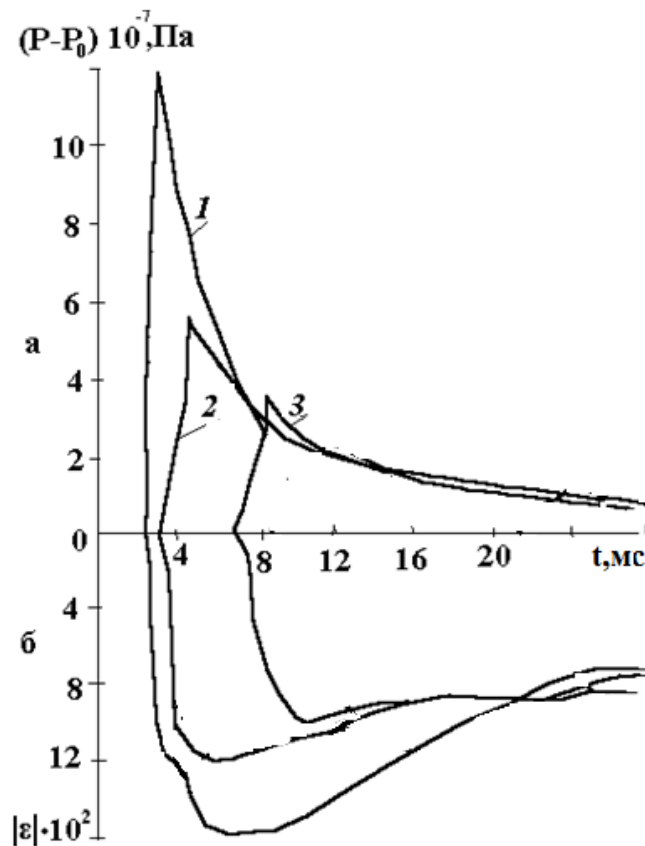


Рисунок 4.5 – Залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) середовища від часу в суглинку №1 на відносній відстані  $r = r / r_0 = 15.07$ : 1 – ігданіту, 2 – спіненої ВР; 3 – спіненої ВР, яка оброблена УЗ

З аналізу цих рисунків видно, що характер залежності тиску і максимальної об'ємної деформації на відповідній відстані від часу такий самий, як на границі з вибуховою порожниною: чим більші значення детонаційних характеристик ВР, тим вищі значення тиску та об'ємної деформації.

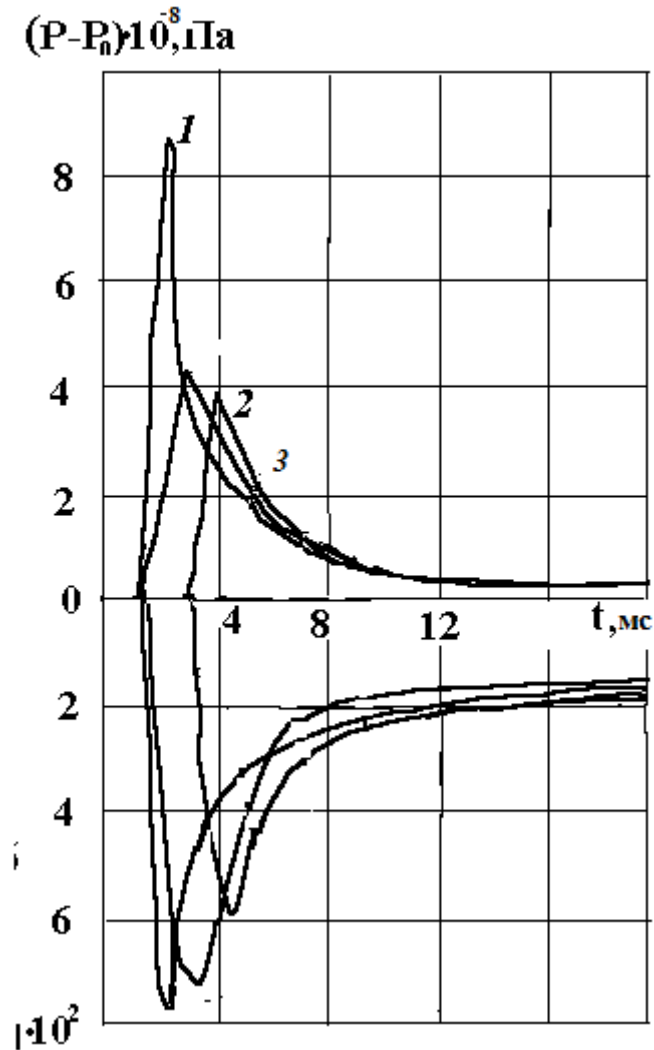


Рисунок 4.6 – Залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) від часу в суглинку №2 на відносній відстані  $r = r/r_0$ : 1 – ігданіту, 2 – спіненої ВР; 3 – спіненої ВР, яка оброблена УЗ

З порівняння рисунків 4.5 і 4.6 можна зробити висновок, що на однаковій відстані від вибухової порожнини в першому суглинку досягаються менші тиски, але більші об'ємні деформації. Це пояснюється тим, що перший ґрунт має більшу щільність і об'ємну пористість, тому є більш стискаємий, а це в свою чергу призводить до більших деформацій навіть при менших значеннях гідростатичного тиску. Збільшення пористості ґрунтового масиву призводить до більш швидкого перетворення ударної хвилі в неперервну хвилю стискання.

Таки самі закономірності спостерігаються і на рисунках 4.7 та 4.8, де зображено діаграми стискання при навантаженні і розвантаженні у суглинках

№1 і №2. При вибуху заряду ігданіту досягаються значно більші значення гідростатичного тиску та максимальної об'ємної деформації, ніж при вибуху спіненої ВР та спіненої ВР, яка оброблена УЗ.

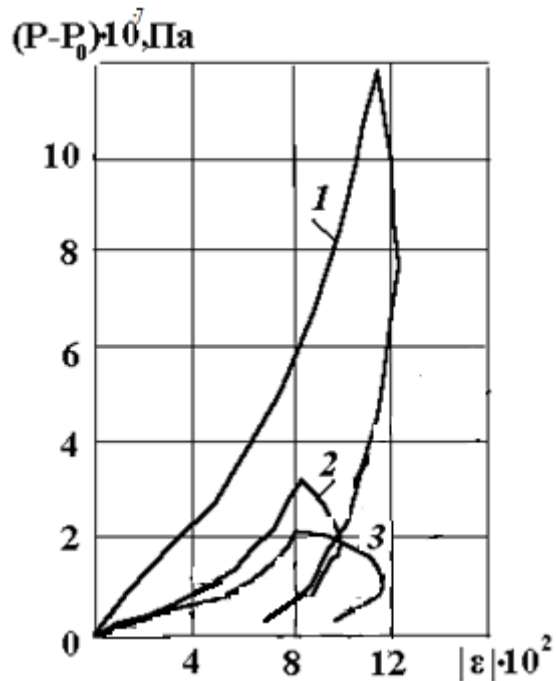


Рисунок 4.7 – Діаграми стискання при навантаженні і розвантаженні у суглинка №1 на відносній відстані  $r = r/r_0 = 15.07 : 1$  – ігданіту, 2 – спіненої ВР; 3 – спіненої ВР, яка оброблена УЗ

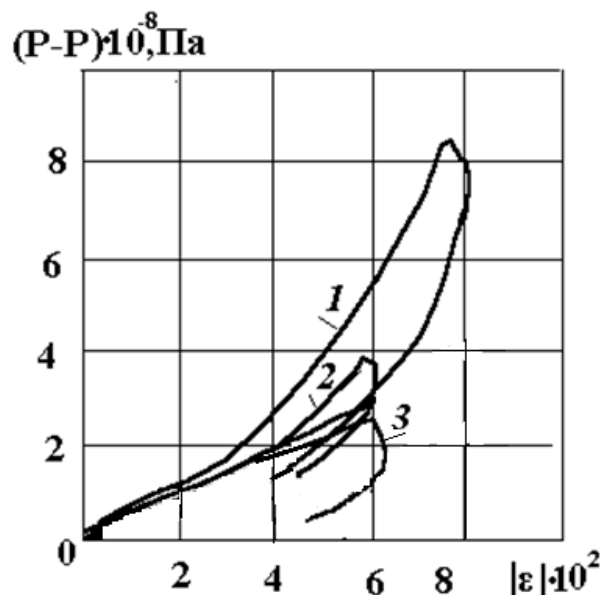


Рисунок 4.8 – Діаграми стискання при навантаженні і розвантаженні у суглинка №2 на відносній відстані  $r = r/r_0 = 15.07 : 1$  – ігданіту, 2 – спіненої ВР; 3 – спіненої ВР, яка оброблена УЗ

Але треба відмітити, що найбільша залишкова деформація досягається при вибухах спінених ВР в порівнянні з вибухом ігданіту. Крім того, при вибуху спіненої ВР, обробленої УЗ, залишкова деформація більша, ніж при вибуху заряду спіненої ВР, не обробленої УЗ, на 9-10 %. Це пов'язано з тим, що час зростання та спаду імпульсу тиску спінених ВР на 13...18 мкс більший, ніж у ігданіту, що призводить до більш повної передачі енергії від продуктів вибуху до ґрунту.

На рисунку 4.9. зображено залежності середнього гідростатичного тиску і об'ємної деформації від часу в суглинку №1 на відносній відстані  $r = r / r_0 = 25,3$ . З аналізу рисунку видно, що з віддаленням від осередку вибуху різниця в максимумах тиску зменшується і складає 16...21 %, а різниця початкових тисків складала 110...120 %. Це пояснюється тим, що хоча ігданіт має більшу щільність і початковий тиск, спінені ВР мають більшу теплоту вибуху.

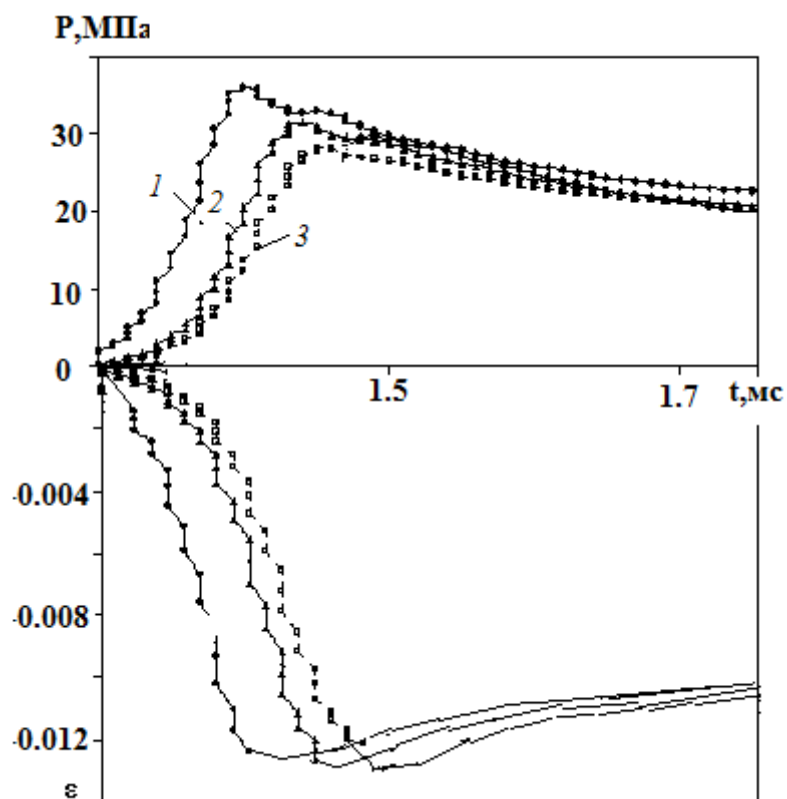


Рисунок 4.9 – Залежності середнього гідростатичного тиску (а) і об'ємної деформації (б) від часу в суглинку №1 на відносній відстані  $r = r / r_0 = 25,3$ : 1 – ігданіту, 2 – спіненої ВР; 3 – спіненої ВР, яка оброблена УЗ

Крім того показник політропи у ігданіту також вищий, а це призводить до більш швидкого загасання ударної хвилі.

Можна відзначити, що на цій відстані не тільки залишкова, але і максимальна об'ємні деформації більші при вибухах спінених ВР, ніж при вибуху ігданіту. Різниця в максимальних об'ємних деформаціях при вибухах ігданіту складає 7...15 % в порівнянні з вибухами спіненої ВР і обробленої УЗ, відповідно.

Цікаво відмітити отриманий чисельними розрахунками результат, який полягає в тому, що на відстанях більших  $40r_0$  найбільші тиск і об'ємні деформації досягаються при вибухах спінених ВР.

#### **Висновки по розділу 4**

1. Інерційне багатокомпонентне ґрунтове середовище з відносно слабкими структурними зв'язками для повноцінного розвитку деформаційного процесу в динамічному режимі потребує більш повільного зростання і спадання навантаження в процесі проходження хвилі напружень. Це ставить відповідні вимоги до параметрів вибухового імпульсу, який забезпечує достатнє навантаження, що довше утримується в часі.

2. Встановлено параметри вибухового імпульсу на межі розподілу «продукти детонації – середовище» для різних типів промислових ВР.

3. Отримано залежність максимального тиску на фронті детонаційної хвилі для різних типів ВР від тривалості вибухового імпульсу, яка свідчить про те, що найменший піковий тиск при найдовшій тривалості вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Максимум тиску цих ВР менше на 20-49%, а тривалість вибухового імпульсу довша в 3 – 3,5 порівняно зі стандартними малошчільними ВР.

4. Час зростання вибухового імпульсу зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням в 2,3 рази більший, ніж для амоніту №6 ЖВ і в 2,47 рази більший за ігданіт.

5. Низьке значення пікового тиску детонації, яке досягається шляхом зниження щільності ВР, зменшує об'ємну концентрацію енергії зарядів, що, в свою чергу, підвищить коефіцієнт корисного використання енергії вибухового перетворення в дальній зоні.

6. Найбільшої ефективності при ущільненні просадних ґрунтів можна досягти при застосуванні спіненої ВР за рахунок дії вибуху на значній відстані від заряду, а відповідно, рівномірному і кращому ущільненню на необхідну глибину.

7. Розроблені способи керування параметрами шару малощільної ВР для визначення характеру ущільнення просадкових ґрунтів дадуть можливість обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення територій просадних ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням.

8. З аналізу отриманих результатів математичного моделювання видно, що в ближній зоні при вибуху заряду ігданіту досягаються значно більші значення гідростатичного тиску та максимальної об'ємної деформації, ніж при вибуху спіненої ВР. Це пояснюється більш високими детонаційними характеристиками ігданіту: щільністю, тиском в точці Жуге. Час досягнення максимумів тиску та деформації при вибуху ігданіту значно менший, тому що і швидкість детонації у ігданіту вища, ніж у спінених ВР.

9. Параметри ударних хвиль при вибухах зарядів нових сумішевих вибухових речовин в середній зоні можна порівняти з такими ж параметрами від традиційних промислових ВР, таких як ігданіт, а дальній зоні вибуху перевершують їх. Різниця в максимальних об'ємних деформаціях при вибухах ігданіту складає 7–15 % в порівнянні з вибухами спіненої ВР та спіненої ВР, обробленої УЗ, відповідно.

При вибуху спіненої ВР, обробленої УЗ, залишкова деформація більша, ніж при вибуху заряду спіненої ВР, не обробленої УЗ, на 9–10 %.

10. Розроблені способи керування параметрами шару малошкілної ВР для визначення характеру ущільнення просадкових ґрунтів дадуть можливість обрати раціональні технологічні схеми вибуху для ущільнення територій просадних ґрунтів покритих поверхневими або горизонтальними циліндричними зарядами вибухових речовин із застосуванням спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням та можна зробити висновок про ефективність застосування нових сумішевих ВР.

## РОЗДІЛ 5

### ЛАБОРАТОРНІ І ПОЛІГОННІ ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТРУКТУРНО-НЕСТІЙКИХ ҐРУНТІВ ВДОСКОНАЛЕНИМИ МАЛОЩІЛЬНИМИ ВР

#### 5.1 Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів вдосконаленими малощільними ВР

Застосування енергії вибуху дозволяє повністю або частково усунути просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів на всю глибину просадної товщі.

При цьому прикладання зовнішнього навантаження до ґрунтового масиву створює об'ємну деформацію середовища та ущільнення ґрунту, головним чином, за рахунок зменшення пористого простору з пружною деформацією зерен скелету, їх взаємним переміщенням, деформацією і руйнуванням скелетних зв'язків.

Дослідження характеру деформування ґрунту під час вибуху на викид показали, що поряд із зоною викидання, в ґрунті існує зона руйнувань або утворення тріщин, що прилягає безпосередньо до межі порожнини, і наступна за нею зона ущільнення, що характеризується підвищеною щільністю ґрунту, яка простягається на відстань до 100 радіусів заряду в суглинках і 50 – 60 радіусів заряду в лесових ґрунтах [124, 125].

Вивчення ущільненої зони від дії камуфлетних зарядів, які застосовуються у вибухових технологіях з усунення просадних властивостей лесових ґрунтів, показало, що глибина цієї зони досягає 100 радіусів заряду, причому застосування низькошвидкісних (низькобризантних) ВР дає значний ефект [77].

Із застосуванням вищенаведеної рецептури (з практично нульовим кисневим балансом) безтротилової ВР (АС/СФ/АП) на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри (АП) був розроблений метод ущільнення просадкових ґрунтів [124]. Для удосконалення та наукового обґрунтування технологічних параметрів методу



був досліджений накладний заряд, який являє собою полімерний корпус прямокутної форми (товщиною 50, 75 і 100 мм.) запаяний з усіх боків, що забезпечує герметизацію внутрішньої порожнини корпусу. Всередині розміщена спінена суміш АС/СФ/АП (з нітрату амонію ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), поверхнево-активної речовини і алюмінієвої пудри) та ініціюючого імпульсу у вигляді петлі з ДШ по формі корпусу і капсуля-детонатора, котрий остаточно приєднується на місцях виконання робіт безпосередньо перед використанням.

В польових умовах були проведені дослідження з визначення роботи таких накладних зарядів на основі малощільної ВР на спроможність її забезпечити ущільнення лесових ґрунтів (таблиці 5.1).

Результати досліджень показали, що застосування енергії вибуху накладних зарядів дозволяє повністю або частково усунути просадні властивості структурно-нестійких ґрунтів на всю глибину просідання товщі. При цьому прикладання зовнішнього навантаження до ґрунтового масиву створює об'ємну деформацію середовища та ущільнення ґрунту, головним чином, за рахунок зменшення порового простору з пружною деформацією зерен скелету, їх взаємним переміщенням, деформацією і руйнуванням скелетних зв'язків.

Дослідження характеру деформування ґрунту під час вибуху накладних зарядів на спроможність їх забезпечити ущільнення структурно-нестійких ґрунтів показали, що в залежності від товщини шару спіненої суміші і форми полімерного корпусу, в ґрунті існує зона ущільнення, що характеризується підвищеною щільністю ґрунту, яка простягається по всій площі (формі полімерного корпусу) на глибину до 50 товщин шару спіненої суміші в суглинках і 20–30 в лесових ґрунтах.

При дослідженні в натуральних умовах малощільної спіненої вибухової суміші АС/СФ/АП для порівняння застосовувалися стандартні ВР, а саме: амоніт №6ЖВ і ігданіт АС/ДТ. Зосереджені заряди досліджуваних ВР масою 14–16 кг розміщувались в ґрунті на оптимальній глибині закладення, що становила 1,7–1,8 м.

Після підривання ВР вимірювалися параметри воронки і величина зони ущільнення. Потім в лабораторних умовах визначалась щільність ґрунту до і після вибуху за допомогою методу «ріжучого кільця». Результати експериментів наведені в таблиці 5.1.

Щільність ґрунту методом «ріжучого кільця» визначалась відношенням маси зразка ґрунту до його об'єму за ДСТУ Б В.2.1-17:2009. «Методи лабораторного визначення фізичних властивостей», який передбачає наступну послідовність.

Спочатку, попередньо виміряне (з точністю до 0,1 мм висота і внутрішній діаметр) за допомогою штангенциркуля і зважене, кільце-пробовідбірник змазують із внутрішньої сторони тонким шаром вазеліну або консистентного мастила. Потім вирівнюють верхню зачищену площину зразка ґрунту, зрізуючи надлишки ґрунту ножом, установлюють на ній ріжучий край кільця та гвинтовим пресом або вручну через насадку злегка вдавлюють кільце в ґрунт, фіксуючи межу зразка для випробувань. Потім ґрунт зовні кільця обрізають на глибину від 5 мм до 10 мм нижче ріжучого краю кільця, формуючи стовпчик діаметром на 1 мм або 2 мм більше ніж зовнішній діаметр кільця. Періодично, у міру зрізання ґрунту, легким натиском преса або насадки насаджують кільце на стовпчик ґрунту, не допускаючи перекосів. Після заповнення кільця ґрунт підрізають від 8 мм до 10 мм нижче ріжучого краю кільця й відокремлюють його.

Ґрунт, що виступає за краї кільця, підрізають ножом, зачищають поверхню ґрунту на рівні з краями кільця й закривають торці пластинками.

Потім зачищають поверхню ґрунту, накривають кільце пластинкою і підхоплюють його знизу пласкою лопаткою. Після чого кільце із ґрунтом і пластинками зважують. Щільність ґрунту  $\rho$  в грамах на кубічний сантиметр обчислюють за формулою:

$$\rho = \frac{m_1 + m_0 + m_2}{V}$$

де  $m_1$  - маса ґрунту з кільцем і пластинками, г;  $m_0$  - маса кільця, г;  $m_2$  - маса пластинок, г;  $V$  - внутрішній об'єм кільця, см<sup>3</sup>.

Дослідження з визначення щільності ґрунту проводили паралельно для трьох відібраних зразків. Різниця між результатами трьох визначень не перевищувала 0,03-0,04 г/см<sup>3</sup>.

Таблиця 5.1 – Отримані результати впливу дії вибуху сумішевих ВР на просадні властивості лесових ґрунтів

№ п/п	Найменування характеристики	Од. вим.	Найменування ВР		
			Амоніт №6ЖВ	Ігданіт АС/ДТ	Малощільна ВР АС/СФ/АП
1	Глибина закладання ВР	м	1,8	1,7	1,7
2	Маса заряду	кг	14	16	16
3	Діаметр воронки	м	4,5	4,6	4,9
4	Глибина воронки	м	1,2	1,2	1,30
5	Об'єм воронки	м <sup>3</sup>	6,3	6,6	8,1
6	Питомі витрати ВР	кг/м <sup>3</sup>	2,22	2,40	1,97
7	Щільність ґрунту: - до ущільнення	10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	1,35-1,40	1,35-1,40	1,35-1,40
	- після ущільнення		1,57-1,65	1,55-1,66	1,66-1,76
8	Деформації	*10 <sup>2</sup>	14,01-15,15	12,9-15,66	18,67-20,45

Як видно з наведених даних, найбільший об'єм воронки забезпечує малощільна спінена ВР, при цьому питома витрата амоніту № 6 ЖВ становить 2,22 кг/м<sup>3</sup>, ігданіту – 2,40 кг/м<sup>3</sup>, малощільної спіненої суміші АС/СФ/АП – 1,97 кг/м<sup>3</sup>. Максимальна щільність ущільненого ґрунту при використанні амоніту досягає  $(1,57 - 1,65) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, ігданіту –  $(1,55 - 1,66) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, малощільної ВР -  $(1,66 - 1,76) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

При ущільненні просадних лесових ґрунтів необхідно забезпечити рівномірність осідання ґрунту по всій площі масиву на необхідну глибину. Відомо, що властивості лесових ґрунтів в більшій мірі залежать від їх вологості. У водонасиченому стані вони легко деформуються під дією зовнішніх навантажень.

Відомий спосіб ущільнення таких ґрунтів, оснований на утворенні похилих бойових свердловин, зорієнтованих осями всередину ущільнюваного масиву. Вибух зарядів призводить до просідання ґрунту під власною вагою [124 – 132].

Недоліком цього способу є те, що він не дозволяє сформувати плоский фронт хвилі, паралельний вільній поверхні, що знижує рівномірність ущільнення ґрунту.

Згідно способу, розробленого у відділі прикладної геодинаміки вибуху [125], що оснований на утворенні зустрічних похилих свердловин, розміщенні в них лінійних зарядів ВР і їхнє підривання, перед утворенням свердловин здійснюють розробку паралельних траншей, а з них проходять попарно зустрічні свердловини під кутом 20–30° до горизонту з перетином їх проекцій на вертикальну площину.

Спосіб реалізується наступним чином. По краях ущільнюваного масиву проходять дві паралельні траншеї шириною до 1,5 м і глибиною до 3,5 м. Відстань між траншеями визначається за формулою:

$$a = \frac{0,75H_{np} - H_{mp}}{\cos \alpha} \quad (5.1)$$

де  $H_{np}$  – потужність просадної товщі, м;  $H_{mp}$  – глибина траншеї, м;  $\alpha$  – кут нахилу свердловин, град.

З дна траншей назустріч одна одній в шаховому порядку під заданим кутом з кроком 2,5 – 3,0 м пробурюють свердловини (рисунки 5.1). У свердловинах розташовують суцільні заряди ВР. Лінійна маса заряду обирається в залежності від потужності просадної товщі ґрунтів і типу ВР і становить 4 – 10 кг/м.

Після заряджання свердловин виконують забивку траншей ґрунтом. Система зарядів працює в умовах камуфлету без розлітання ґрунту. Після висадження зарядів оконтурений траншеями ґрунтовий масив рівномірно ущільнюється.

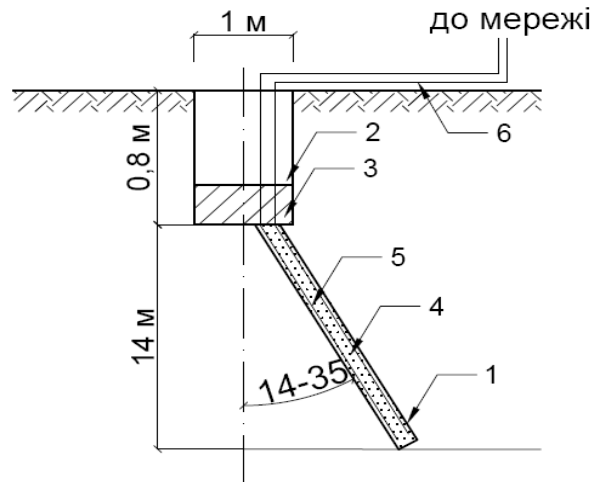


Рисунок 5.1 – Ущільнення ґрунтів за допомогою зарядів ВР, розташованих у похилих свердловинах: 1 – свердловина; 2 – траншея; 3 – ґрунтова забивка; 4 – спінена ВР; 5 – ДШ; 6 – магістраль

У таблиці 5.2 наведені дані ущільнення лесових ґрунтів вище описаним способом при кутах нахилу свердловин  $14 - 35^\circ$  із застосуванням різних типів ВР (ігданіта та малощільної суміші АС/СФ/АП), а на рисунках 5.2 і 5.3 показано вплив типу ВР та кута нахилу свердловини на ступінь ущільнення ґрунтового масиву.

Таблиця 5.2 – Отримані результати ущільнення лесових ґрунтів вибуховим способом при різних кутах нахилу свердловин

№ п/п	Глибина Н, м	Початкова щільність ґрунту, $10^3 \text{ кг/м}^3$	Щільність ущільненого ґрунту при різних кутах нахилу свердловин, $10^3 \text{ кг/м}^3$									
			Ігданіт АС/ДТ					Малощільна ВР АС/СФ/АП				
			14°	20°	25°	30°	35°	14°	20°	25°	30°	35°
1	2	1,35-1,37	1,48	1,47	1,43	1,47	1,45	1,47	1,48	1,49	1,49	1,46
2	4	1,36-1,38	1,58	1,64	1,65	1,63	1,60	1,55	1,66	1,67	1,67	1,67
3	6	1,34-1,36	1,57	1,66	1,63	1,68	1,56	1,60	1,69	1,69	1,72	1,58
4	7	1,40-1,42	1,58	1,61	1,60	1,55	1,58	1,60	1,65	1,72	1,76	1,62
5	8	1,30-1,32	1,55	1,60	1,58	1,62	1,58	1,54	1,72	1,70	1,72	1,57
6	9	1,41-1,43	1,59	1,63	1,62	1,56	1,60	1,48	1,70	1,71	1,68	1,54
7	10	1,50-1,52	1,56	1,60	1,60	1,59	1,59	1,55	1,68	1,67	1,75	1,60
8	12	1,35-1,37	1,57	1,59	1,59	1,57	1,55	1,59	1,67	1,69	1,73	1,64
9	14	1,44-1,46	1,60	1,57	1,55	1,63	1,61	1,62	1,75	1,76	1,76	1,68

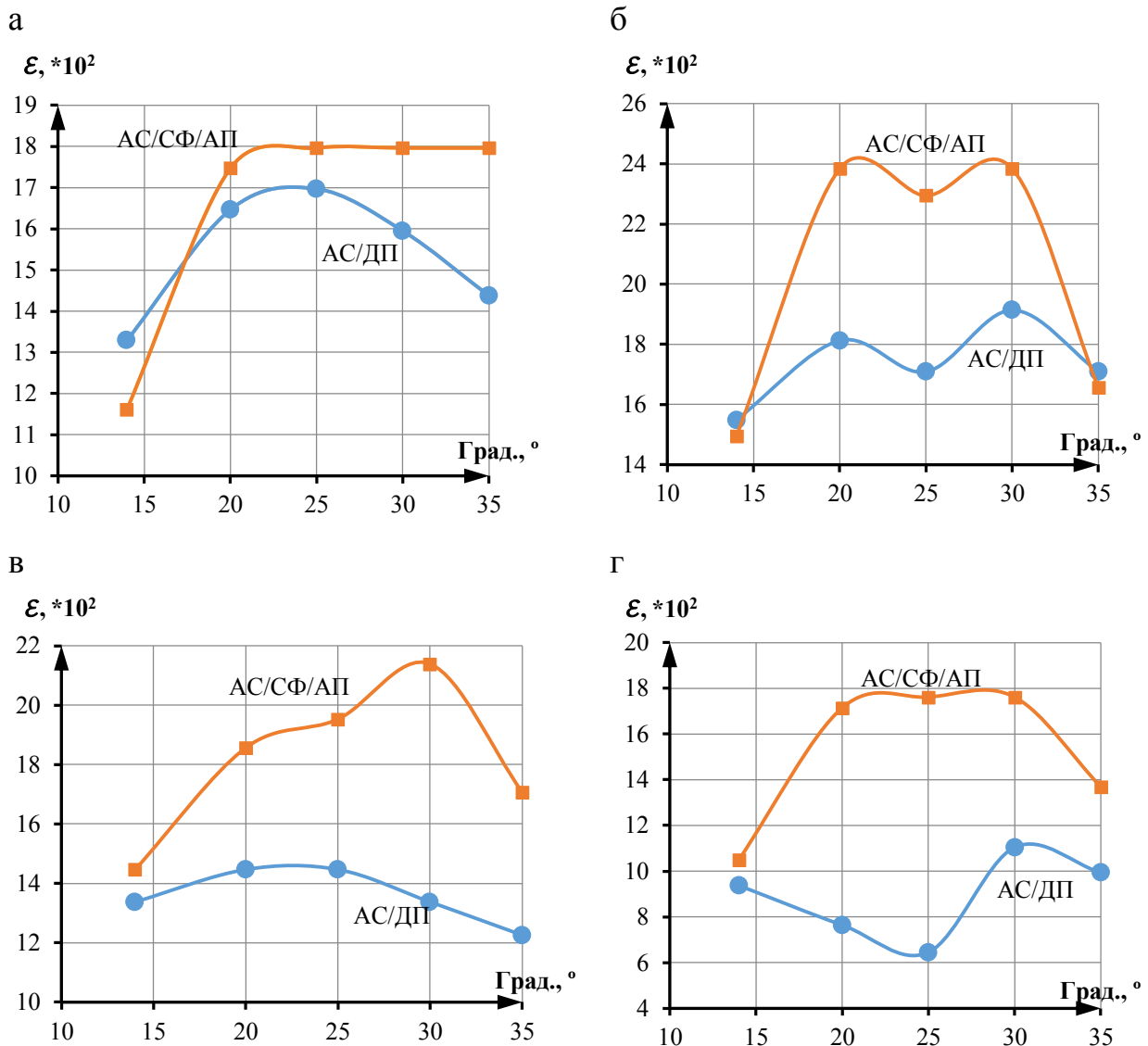


Рисунок 5.2 – Деформації ґрунту при різних кутах нахилу свердловини:  
а – на глибині 4 м; б – на глибині 8 м; в – на глибині 12 м; г – на глибині 14 м

Отримані дані (рис 5.2) свідчать про те, що вплив кута нахилу свердловини на деформації ґрунтового масиву носить не лінійний характер. Спочатку, при збільшенні кута нахилу свердловини до 20°, відбувається деякий приріст деформацій на всю глибину ґрунтового масиву. Потім, при кутах нахилу свердловини в межах 20–30°, чітко спостерігається значний приріст деформацій по всій глибині ґрунтового масиву. При подальшому зростанні кута нахилу свердловини знову відбувається деяке затухання деформацій.

З таблиці 5.2 видно, що при оптимальних кутах нахилу свердловин у  $20\text{--}30^\circ$  більш високі деформації ущільненого ґрунту  $(1,75 - 1,76) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  отримано при застосуванні малошкілної ВР.

Заряди ігданіту забезпечують менший, хоча і достатній для практичних цілей, ефект ущільнення - максимальна щільність ґрунту при цьому становить  $(1,55 - 1,63) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

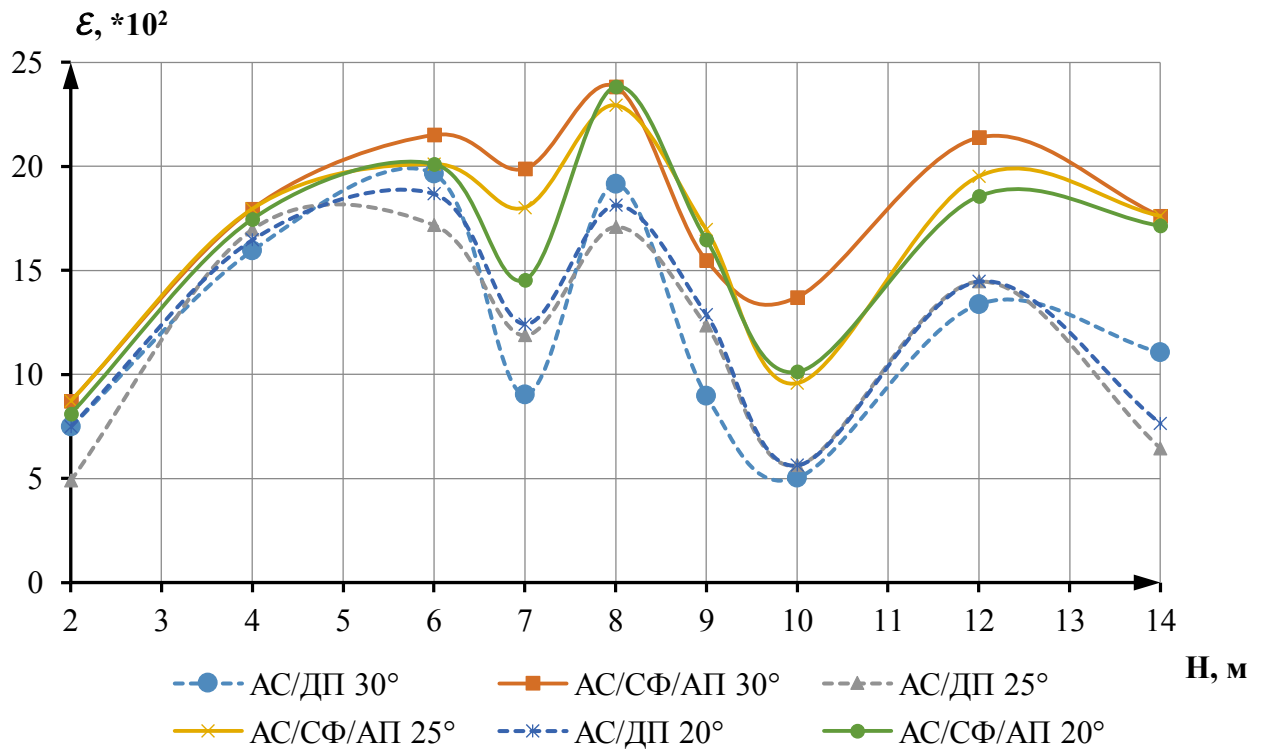


Рисунок 5.3 – Залежність деформацій ґрунтового масиву від типу ВР та кута нахилу свердловини

Причому, саме ущільнення (деформації) носить пульсуючий характер (табл. 5.2, рис. 5.3). Тобто, спочатку до глибини 4,5 – 6 м для ігданіту і 6 – 7 м для малошкілної ВР спостерігається різкий скачок щільності (деформацій). Після чого відбувається деякий спад, і знову підвищення щільності (деформацій). З глибиною ця пульсація затухає. Таку поведінку ущільнення (деформацій) ґрунтового масиву можна пояснити тим, що під час вибуху, по мірі розповсюдження детонації вздовж заряду, виділяється значна кількість газів, яка діє в глиб ґрунтового масиву. При цьому утворюється зона ущільнення. Після того, як гази продуктів детонації перестають діяти на ґрунтовий масив,

відбувається зворотний ефект, тобто утворюється зона розвантаження, яка призводить до зниження щільності (зменшення деформацій).

Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. А це, в свою чергу, призводить до більш тривалої дії газів продуктів детонації на оточуючий масив, а відповідно, і збільшення щільності.

Недоліками цього способу є значні енерговтрати на буріння свердловин, визначення необхідного кута нахилу та трудомісткість при його дотриманні.

З метою усунення цих недоліків пропонується спосіб ущільнення ґрунтів, оснований на виготовленні накладних зарядів зі спіненої суміш АС/СФ/АП (з нітрату амонію ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), поверхнево-активної речовини та алюмінієвої пудри), розміщених в попередньо розроблених та зволожених траншеях по всій площі ущільнення та зустрічним їх ініціюванням (рисунок 5.4) [109]. У траншеях розташовують суцільні заряди ВР. Лінійна маса заряду обирається в залежності від потужності просадної товщі ґрунтів і становить 10–15 кг/м спіненої суміші.

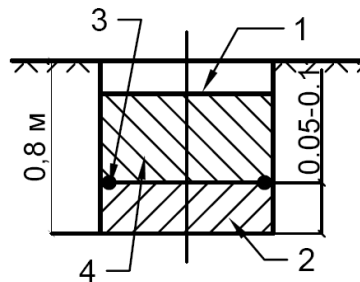


Рисунок 5.4 – Ущільнення ґрунтів за допомогою накладних зарядів ВР:  
1 – траншея; 2 – заряд спіненої ВР; 3 – ДШ; 4 – ґрунтова забивка

Після зарядження траншей виконують забивку її ґрунтами і підривають, в результаті чого оточуючий ґрунтовий масив рівномірно ущільнюється.

У таблиці 5.3 та на рисунок 5.5 – 5.8 наведені дані ефективного ущільнення лесових ґрунтів вище описаним способом різної потужності (товщини) накладного заряду із застосуванням різних типів ВР (ігданіту та малощільної спіненої суміші АС/СФ/АП).



Таблиця 5.3 – Отримані результати ущільнення лесових ґрунтів вибуховим способом при застосуванні різних накладних зарядів

№ п/п	Глибина Н, м	Початкова щільність ґрунту, $10^3 \text{ кг/м}^3$	Щільність ущільненого ґрунту при різній товщині накладних зарядів, $10^3 \text{ кг/м}^3$					
			Ігданіт АС/ДТ			Малошільна ВР АС/СФ/АП		
			50 мм	75 мм	100 мм	50 мм	75 мм	100 мм
1	0,25	1,35-1,37	1,63	1,66	1,68	1,70	1,72	1,75
2	0,50	1,36-1,38	1,62	1,64	1,65	1,67	1,69	1,71
3	0,75	1,34-1,36	1,58	1,60	1,62	1,63	1,65	1,68
4	1,00	1,40-1,42	1,60	1,63	1,65	1,60	1,61	1,66
5	1,25	1,30-1,32	1,42	1,53	1,57	1,57	1,58	1,60
6	1,50	1,41-1,43	не змінна	1,51	1,63	1,51	1,63	1,64
7	2,00	1,50-1,52	не змінна	не змінна	1,61	не змінна	1,58	1,61
8	2,50	1,35-1,37	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	1,50
9	3,00	1,44-1,46	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	не змінна	1,49

Як видно з таблиці 5.3 та з рисунків 5.5 – 5.8 характер ущільнення ґрунтового масиву поверхневими накладними зарядами, як і свердловинними, носить нелінійний пульсуючий характер. Ущільнення, а відповідно, і деформації ґрунтового масиву при цьому виконуються на глибину 1,25 м, 1,5 м і 2,0 м при потужності заряду відповідно 50 мм, 75 мм, і 100 мм для ігданіту та на глибину 1,5 м, 2,0 м і 3,0 м при потужності заряду відповідно 50 мм, 75 мм, і 100 мм для малошільної ВР.

Початкове ущільнення на глибині 0,25 м малошільною ВР дещо вище, ніж при застосуванні ігданіту, і знаходиться в межах для малошільної ВР від 1,7 до  $1,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  і для ігданіту – від 1,63 до  $1,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Залежність глибини ущільнення ґрунтового масиву від потужності заряду ВР (рис. 5.9) носить лінійний характер. При потужностях заряду 50, 75, і 100 мм глибина ущільнення ґрунту малошільною ВР відповідно на 25, 20 і 17 % більша, ніж ігданітом.

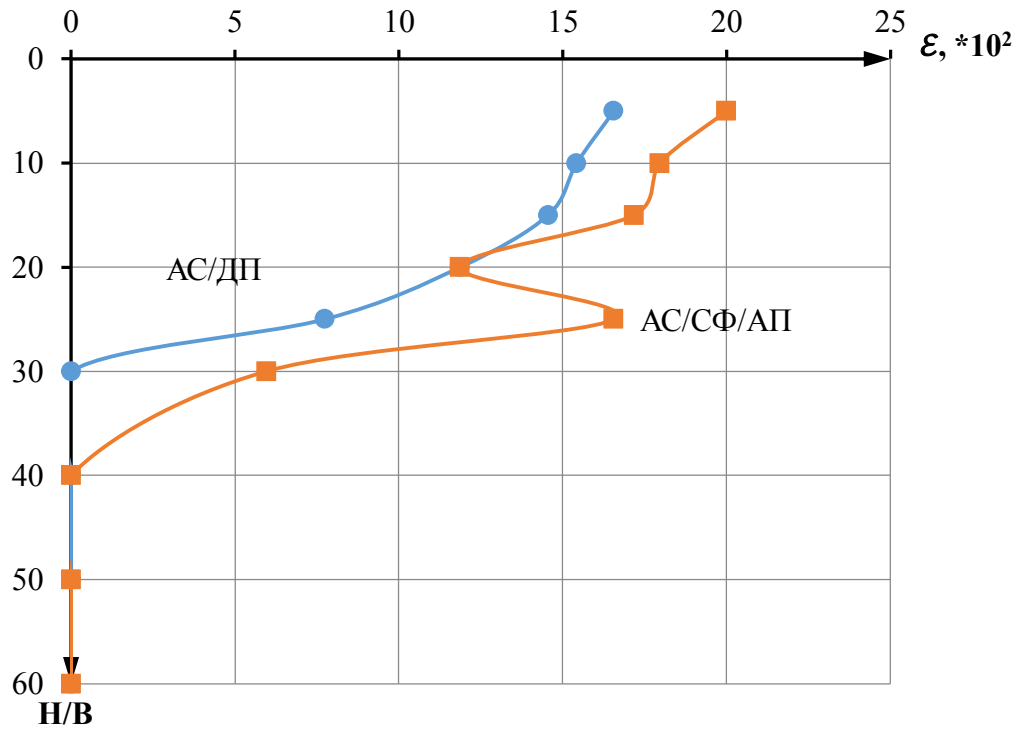


Рисунок 5.5 – Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 50 мм

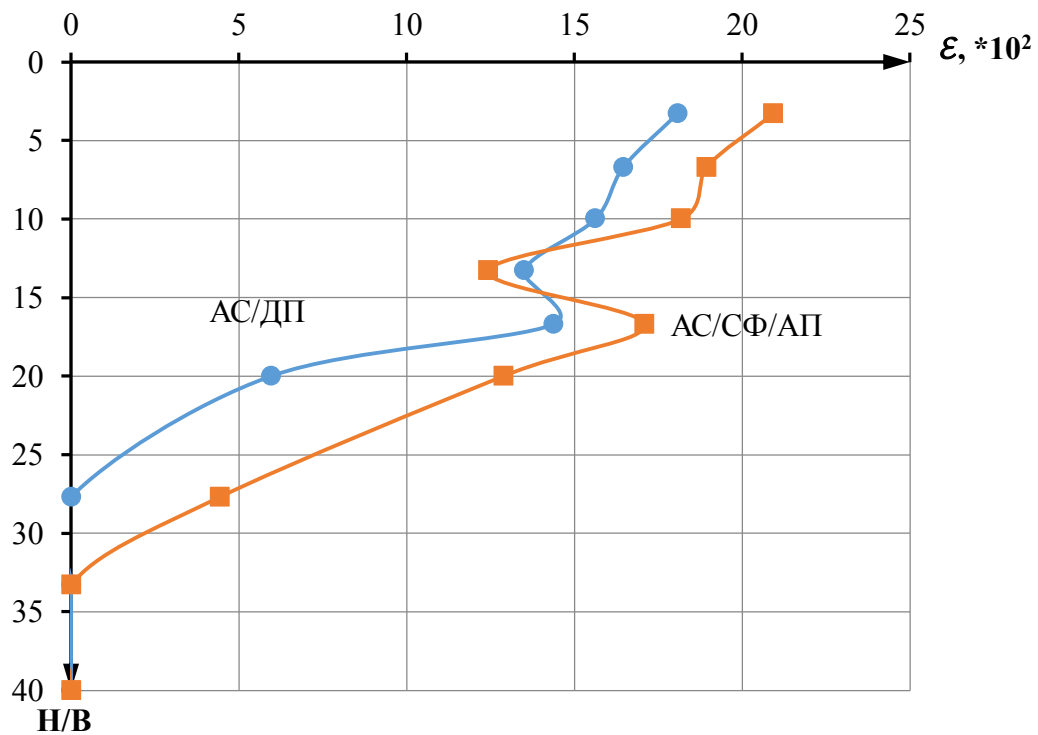


Рисунок 5.6 – Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 75 мм

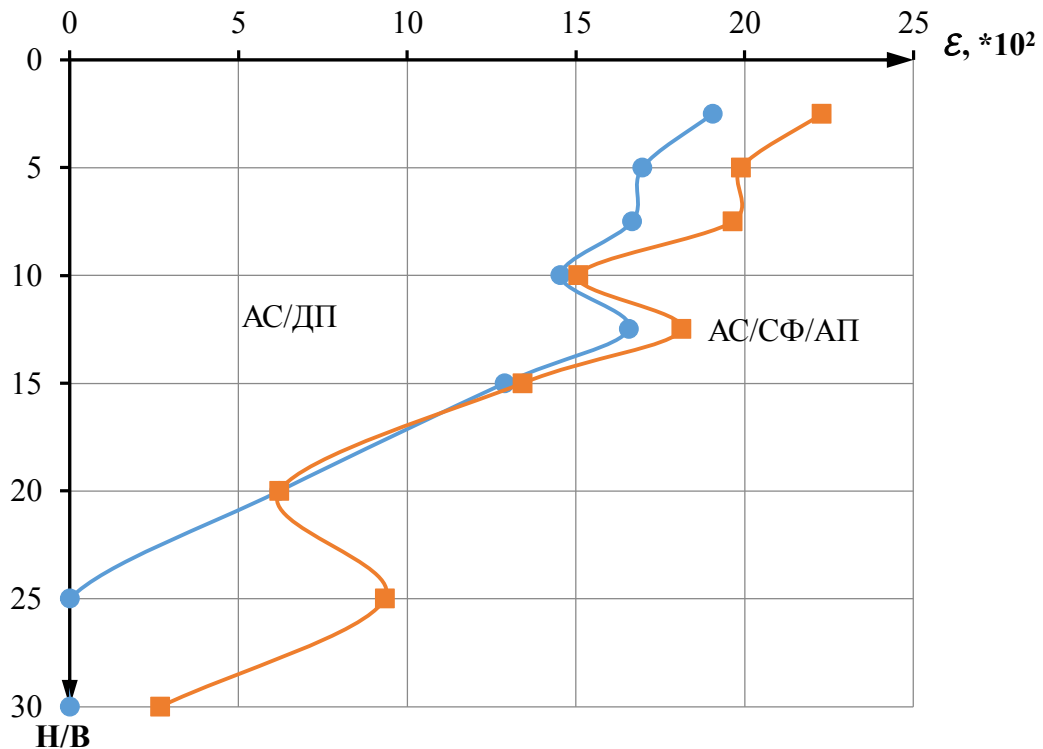


Рисунок 5.7 – Залежність деформації ґрунтового масиву від типу ВР потужністю 100 мм

Таким чином, можна підібрати таку потужність заряду, яка забезпечить ущільнення ґрунтового масиву на необхідну глибину.

Результати проведених експериментів свідчать про те, що низькошвидкісні та малоцільні ВР забезпечують ущільнення просадних лесових ґрунтів на більшу глибину масиву. Причому малоцільні спінені заряди на основі АС/СФ/АП забезпечують ущільнення на більш значну глибину 1,5 – 3,0 м, що становить 27–30 потужностей заряду або 20-35 % більше у порівнянні з ігданітом, що забезпечує ущільнення на глибину 1,25 – 2,0 м або 20 – 25 потужностей заряду.

Це можна пояснити перерозподілом енергії у вибуховому імпульсі за рахунок зниження пікового тиску і збільшення загальної тривалості фази стиснення. Останнє дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переущільнення ґрунту та збільшити тривалість дії самого ущільнення, що безпосередньо впливає на її глибину.

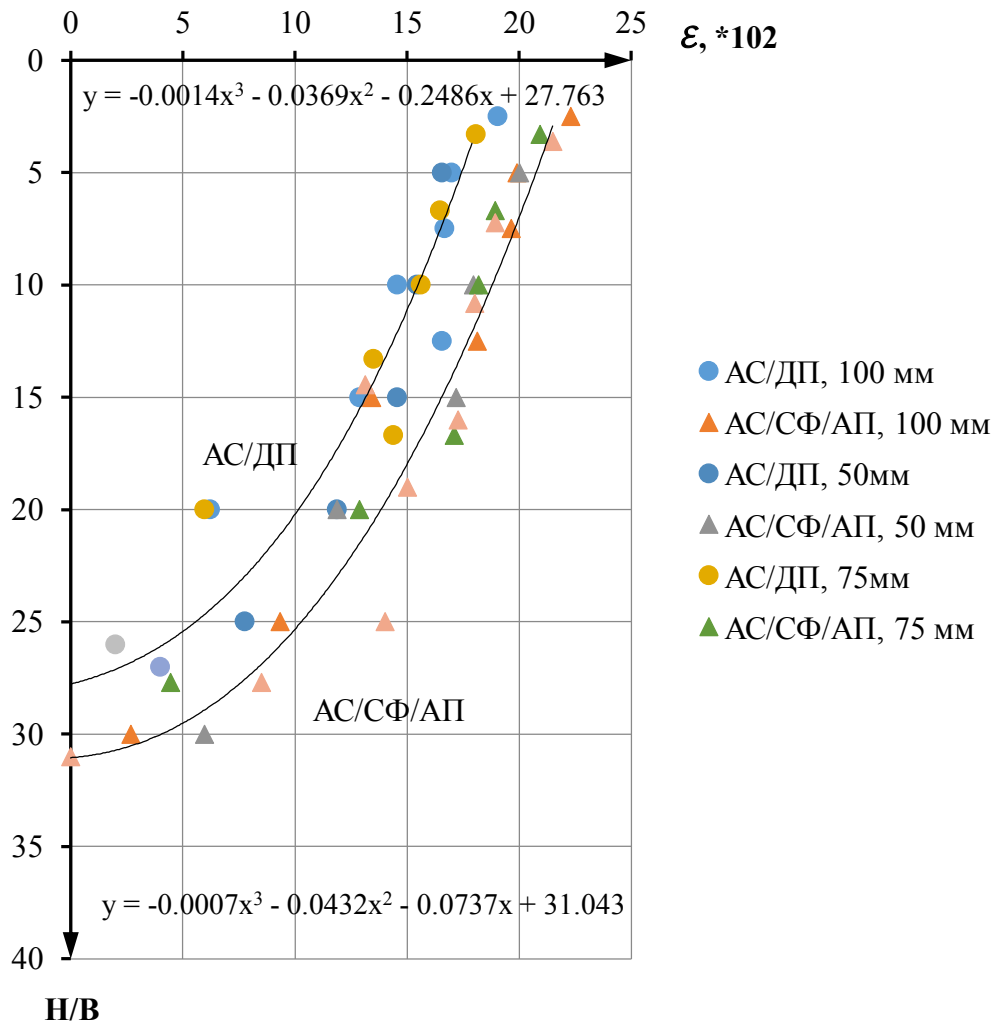


Рисунок 5.8 – Залежність деформацій лесових ґрунтів від типу ВР

Найбільший ступінь ущільнення досягається при застосуванні зарядів на основі АС/СФ/АП і становить  $(1,70-1,75) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . При цьому щільність просадних лесових ґрунтів збільшується від 7 % – 16 % на глибині 1,5 м до 26 % – 29 % на глибині 0,25 м.

Заряди ігданіту забезпечують менший, хоча і достатній для практичних цілей, ефект ущільнення – максимальна щільність ґрунту при цьому становить  $(1,63 - 1,68) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . При цьому щільність просадних лесових ґрунтів збільшується від 9 % – 20 % на глибині 1,25 м до 20 % – 24 % на глибині 0,25 м.

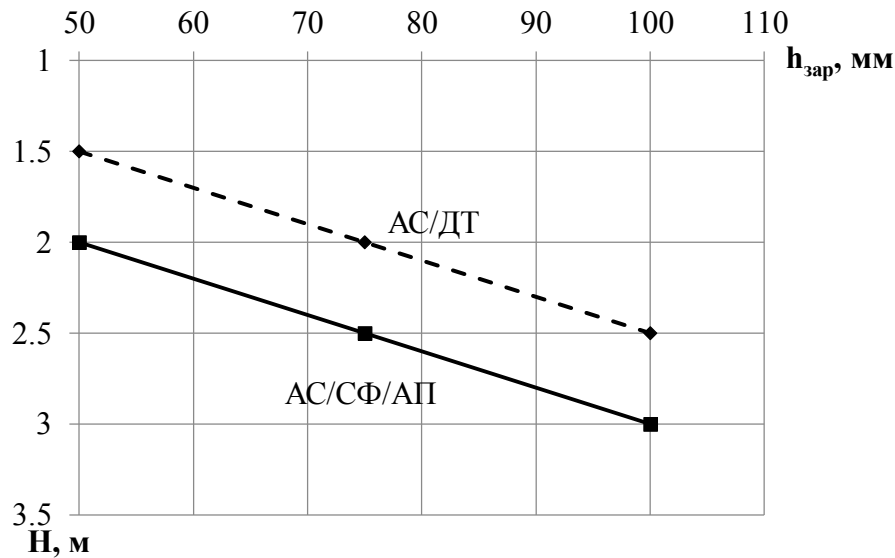


Рисунок 5.9 – Залежність глибини ущільнення ґрунтового масиву від потужності заряду

Аналіз отриманих даних показує, що об'ємна концентрація енергії в зарядній порожнині при використанні малошільних сумішей нижче, ніж у стандартних ВР, працездатність за методом воронкоутворення і ефективність ущільнення, навпаки, вище у малошільних сумішевих ВР. Це можна пояснити перерозподілом енергії у вибуховому імпульсі за рахунок зниження пікового тиску і збільшення загальної тривалості фази стиснення. Останнє дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переподрібнення і переущільнення ґрунту.

На практиці можливий варіант застосування комбінованих зарядів, почергово комбінуючи основну масу малошільної вибухової речовини ігданітом або штатною стандартною ВР. Це дозволить підвищити стабільність детонаційного процесу в зарядах і істотно знизити вартість вибухових технологій ущільнення лесових ґрунтів. При цьому в нижній частині зарядів частка штатного ВР може бути збільшена в 2 – 3 рази в порівнянні з верхньою половиною зарядної колонки.

Ініціювання зарядів у всіх випадках слід здійснювати за допомогою дублювання ліній ДШ.

Запропонований метод ущільнення просадних лесових ґрунтів накладними зарядами за рахунок нових вдосконалених рецептур безтритилових ВР на основі аміачної селітри потребувало подальшого вдосконалення, а саме, відповідної механізації щодо приготування малощільних ВР та заповнення на необхідну площу ущільнення.

## 5.2 Вплив зміни фізико-механічних характеристик на просадні властивості лесових ґрунтів

Попередньо оцінити просадні властивості лесових ґрунтів можна, по так званих, номенклатурних критеріях [132], а саме: ступені вологості ( $S_r$ ), яка повинна бути менше 0,8 і показнику ( $I_{ss}$ ), що визначається за формулою;

$$I_{ss} = \frac{e_L - e}{1 + e} \quad (5.2)$$

де  $e$  – коефіцієнт пористості ґрунту природної структури і вологості;  $e_L$  – коефіцієнт пористості, який відповідає вологості на межі текучості  $W_L$  і визначається за формулою:

$$e_L = \frac{W_L \cdot \rho_s}{\rho_w} \quad (5.3)$$

Значення показника  $I_{ss}$  залежить від числа пластичності ґрунту  $I_p$  і відповідно становить: при  $1 \leq I_p < 10 - I_{ss} = 0,1$ ; при  $10 \leq I_p < 14 - I_{ss} = 0,17$ ; при  $14 \leq I_p < 22 - I_{ss} = 0,24$ .

Але найважливішим показником, який характеризує просадні властивості ґрунтів – є відносне просідання  $\varepsilon_{sl}$ . Ґрунти відносяться до просадних при  $\varepsilon_{sl} \geq 0,01$ . По діючих нормах [4]  $\varepsilon_{sl}$  – це відносна стисливість зразків просадного ґрунту без можливості бокового розширення для заданого тиску при їх водонасиченні до ступеня вологості  $S_r \geq 0,8$ , а фактично  $\varepsilon_{sl}$  – це різниця відносної стисливості зразків при природній вологості та у водонасиченому стані для заданого тиску.

Відносне просідання ґрунту  $\varepsilon_{sl}$  на основі випробувань зразків на стиск без

можливості бокового розширення визначається за формулою [3]:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{n.p} - h_{sat.p}}{h_{n.g}} \quad (5.4)$$

де  $h_{n.p}$  та  $h_{sat.p}$  – висота зразка відповідно природної вологості і після його повного водонасичення ( $W = W_{sat}$ ) при тиску  $p$ , який дорівнює вертикальному напруженню на даній глибині від зовнішнього навантаження ( $\sigma_{zp}$ ) і власної ваги ґрунту ( $\sigma_{zg}$ );  $p = \sigma_{zp} + \sigma_{zg}$  – для визначення просадки ґрунту у верхній зоні просідання; при визначенні просадок ґрунту у нижній зоні просідання також враховується, при необхідності, додаткове навантаження від сил негативного тертя;  $h_{n.g}$  – висота того ж зразка природної вологості при  $p = \sigma_{zg}$ .

Як видно із формули (4.4), найбільш доцільно, для визначення величини  $\varepsilon_{sl}$ , використовувати метод паралельних випробувань двох зразків, тобто метод «двох кривих». Відносне просідання є однією із основних характеристик просадних ґрунтів і використовується у наступних випадках:

- при розрахунку можливих величин просадок, як в деформованій зоні основ від дії фундаментів, так і під навантаженням від власної ваги ґрунтів;
- при визначенні загальної оцінки просадних властивостей ґрунтів;
- при визначенні типу ґрунтових умов за просіданням;
- при визначенні критеріїв початку розвитку просідання – початкового тиску просідання  $p_{sl}$  і початкової (критичної) вологості просідання  $W_{sl}$ .

При дослідженні просадних, а також ущільнених лесових ґрунтів методом «двох кривих» можна визначити деформаційні характеристики та їх відносне просідання у широкому діапазоні тисків, що є беззаперечною перевагою даного методу, суть якого у тому, що досліди проводять паралельно на двох зразках, відібраних із одного моноліту. Один зразок ґрунту з природною або заданою вологістю навантажується ступенями до заданого кінцевого тиску із стабілізацією осадок на кожній ступені. Після цього зразок замочують до

стабілізації просідання. Другий зразок замочують перед навантаженням, а потім при безперервному замочуванні навантажують ступенями до заданого тиску.

За даними лабораторних досліджень можна визначити:

– початковий тиск просідання  $p_{sl}$ , МПа при  $\varepsilon_{sl} = 0,01$ , тобто мінімальний тиск, при якому проявляються властивості просідання ґрунтів при його замочуванні до ступеня вологості  $S_r \geq 0,8$ ;

– компресійний модуль деформації ґрунтів природної вологості та у водонасиченому стані.

При визначенні модуля деформації спочатку визначається коефіцієнт стисливості  $m_0$  за формулою [129, 132]:

$$m_0 = \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta P} \cdot (1 + e_0) \quad (5.5)$$

де  $\Delta e, \Delta \varepsilon$  – відповідно зміна коефіцієнту пористості та відносного стиснення у межах вибраної прямолінійної ділянки графіку залежності відносного стиснення від тиску  $\varepsilon = f(p)$ ;  $\Delta p$  – інтервал тиску в МПа, на якому вираховується значення  $m_0$ , приймається не менше 0,1 МПа (звичайно, інтервал тиску приймається для величин тиску від 0,1 до 0,2 МПа, або для діапазону тиску від 0,05 до 0,25 МПа);  $e_0$  – коефіцієнт пористості зразка природної структури, якщо відносне стиснення вираховується по відношенню до початкової висоти зразка або коефіцієнт пористості ґрунту із природною вологістю при природному тиску, якщо  $\varepsilon$  вираховується по відношенню до висоти зразка, обтиснутого природним тиском.

Модуль деформації по компресійним випробуванням  $E_k$  визначається за формулою [129]:

$$E_k = \frac{\Delta p \cdot \beta}{\Delta l} = \frac{\beta}{m_0} (1 + e_0) \quad (5.6)$$

де  $\beta$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від коефіцієнта бічного розширення ґрунту і приймається  $\beta = 0,74$  – для лесоподібних супісків та лесів;  $\beta = 0,63$  – для лесоподібних суглинків;  $\beta = 0,4$  – для лесоподібних глин.



Як і для звичайних не просадних ґрунтів модуль деформації  $E_k$ , отриманий при компресійних дослідженнях у 1,5–10 разів менше, ніж при штампових польових випробуваннях. Тому для знаходження фактичного модуля загальної деформації можна використовувати перехідні коефіцієнти  $m_k$ .

Для визначення початкової (критичної) вологості просідання  $W_{sl}$  просадних ґрунтів за результатами компресійних випробувань зразків ґрунтів із різною вологістю будуються відповідні графіки  $\varepsilon_w=f(p)$ . На цьому ж графіку проводиться допоміжна крива, паралельна кривій відносного стиснення ґрунту із природною вологістю, що відповідає відносному просіданню (різниця ординат обох кривих)  $\varepsilon_{se}=0,01$ . Ордината точки цього графіка, що відповідає мінімальному тиску, при якому проявляються просадні властивості (в стані повного водонасичення), являє собою початковий тиск просідання.

По точках перетину цієї кривої з кривими відносного стиснення ґрунту при різних вологості визначаються значення початкової вологості. Отримані величини початкової вологості і відповідні їм тиски використовуються для побудови графіка залежності початкової вологості від тиску.

За результатами цих досліджень визначаються також значення відносного просідання ґрунту при різних значеннях проміжної вологості  $\varepsilon_{slw}$ , як різниця кривих  $\varepsilon_{sew}=f(p)$  і кривої  $\varepsilon_{w0}=f(p)$  ґрунту із природною вологістю. На основі цього можуть бути побудовані графіки залежності відносного просідання  $\varepsilon_{sw}$  від вологості при різних величинах тиску.

Для відбору зразків лесових ґрунтів був пройдений шурф на глибину 6,0 м. З якого було відібрано по 5 – 6 монолітів лесового ґрунту розмірами 15х15х15 см та 20х20х20 см на глибинах 2,5 м; 3,0 м та 6,0 м. Зразки непорушеної структури у вигляді монолітів були доставлені у лабораторію механіки ґрунтів кафедри геоінженерії із збереженням природної вологості. Для цього, кожен моноліт був обгорнутий плівкою з поліетилену без можливого доступу повітря. Крім того, для фіксації просторового розташування та глибини відбору всі зразки лесового ґрунту були відповідним чином промарковані.

На першому етапі, для даних зразків лесового ґрунту були визначені основні фізичні властивості, які наведені у таблиці 5.4. На другому етапі – були визначені деформаційні характеристики цих зразків при різних щільності

(таблиці 5.5). Ці характеристики були визначені як для зразків у природному стані, так і при повному водонасиченні. В обох таблицях наведені осереднені дані по 5–6 випробуванням.

Таблиця 5.4 – Основні фізичні характеристики відібраних зразків лесового ґрунту

Глибина	Щільність ґрунту	Природна вологість	Щільність скелету ґрунту	Вологість на межі текучості	Вологість на межі розкочування	Число пластичності	Показник текучості	Щільність мінеральних часток	Коефіцієнт пористості
м	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	$W_e$ , д. од.	$\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	$W_l$ , д. од.	$W_p$ , д. од.	$I_p$	$I_l$	$\rho_s$ г/см <sup>3</sup>	$e$
2,5	$\frac{1,55-1,62}{1,58}$	$\frac{0,137-0,143}{0,140}$	$\frac{1,36-1,42}{1,39}$	0,24-0,26	0,20-0,21	0,04	Менше 0	$\frac{2,63-2,65}{2,64}$	$\frac{0,934-0,866}{0,900}$
3,0	$\frac{1,59-1,64}{1,62}$	$\frac{0,138-0,142}{0,140}$	$\frac{1,39-1,44}{1,42}$	0,24-0,26	0,20-0,22	0,04	Менше 0	$\frac{2,63-2,67}{2,65}$	$\frac{0,892-0,854}{0,873}$
6,0	$\frac{1,67-1,77}{1,72}$	$\frac{0,137-0,143}{0,140}$	$\frac{1,46-1,55}{1,51}$	0,23-0,26	0,20-0,22	0,04	Менше 0	$\frac{2,64-2,68}{2,66}$	$\frac{0,808-0,729}{0,7685}$

Результати визначення гранулометричного складу лесових ґрунтів аерометричним методом показали, що вони відносяться до алевритів, тобто пилюватих утворень, і по вмісту фракцій мають такий склад: піщаних часток розміром  $> 0,25$  мм – 1 %, розміром 0,25 – 0,1 мм – 5,3 %; пилюватих часток розміром 0,1 – 0,05 мм – 88,98 %, 0,05 – 0,01 мм – 0,08 %, розміром 0,01 – 0,005 мм – 0,01 %; глинистих часток розміром  $< 0,005$  мм – 4,63 %.

Щільність лесових ґрунтів природного стану складала відповідно: на глибині 2,5 м – від 1,55 г/см<sup>3</sup> до 1,62 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,58 г/см<sup>3</sup>; на глибині 3,0 м –

від 1,59 г/см<sup>3</sup> до 1,64 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,62 г/см<sup>3</sup>; на глибині 6,0 м – від 1,67 г/см<sup>3</sup> до 1,77 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,72 г/см<sup>3</sup>.

Природна вологість ґрунтів  $W_e$  коливалось у дуже тісних межах – від 0,137 до 0,143, в середньому – 0,14.

Відповідно щільність скелету ґрунту  $\rho_d$ , яка визначалась за формулою [132]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + W_e} \quad (5.7)$$

Складала відповідно: на глибині 2,5 м – від 1,36 г/см<sup>3</sup> до 1,42 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,39 г/см<sup>3</sup>; на глибині 3,0 м – від 1,39 г/см<sup>3</sup> до 1,44 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,42 г/см<sup>3</sup>; на глибині 6,0 м – від 1,46 г/см<sup>3</sup> до 1,55 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 1,51 г/см<sup>3</sup>.

Щільність мінеральних часток  $\rho_s$ , яка визначалась пікнометричним методом складала відповідно: на глибині 2,5 м – від 2,63 г/см<sup>3</sup> до 2,65 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 2,64 г/см<sup>3</sup>; на глибині 3,0 м – від 2,63 г/см<sup>3</sup> до 2,67 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 2,65 г/см<sup>3</sup>; на глибині 6,0 м – від 2,64 г/см<sup>3</sup> до 2,68 г/см<sup>3</sup>, в середньому – 2,66 г/см<sup>3</sup>.

Відповідно коефіцієнт пористості « $e$ » для лесових ґрунтів у природному стані, якій визначався за формулою:

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (5.8)$$

складає відповідно: на глибині 2,5 м – від 0,866 до 0,934, в середньому – 0,900; на глибині 3,0 м – від 0,854 до 0,892, в середньому – 0,873; на глибині 6,0 м – від 0,729 до 0,808, в середньому – 0,7685.

Таблиця 5.5 – Деформаційні характеристики лесових ґрунтів при різних щільності

Щільність ґрунту, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Відносна стисливість, відносне просідання	Вертикальний тиск, МПа						Початковий тиск просідання, $p_{sl}$ , МПа	Модуль загальної деформації в інтервалі 0,1-0,2МПа $E=E_k \cdot m_k$ , МПа, $m_k=2$ для супісків
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3		
1,58	у природному стані $W=0,14$	0,021	0,0318	0,0387	0,0409	0,0437	0,0475	–	13,36
	у водонасиченому стані $W_{sat}=0,26$	0,0257	0,0431	0,0551	0,0672	0,0798	0,0913	–	7,50
	відносне просідання	0,0047	0,0113	0,0164	0,0263	0,0361	0,0438	0,095	–
1,62	у природному стані $W=0,14$	0,0071	0,0134	0,0224	0,0293	0,0331	0,0364	–	13,44
	у водонасиченому стані $W_{sat}=0,26$	0,0148	0,0211	0,0341	0,0447	0,0571	0,0667	–	7,74
	відносне просідання	0,0077	0,0077	0,0117	0,0154	0,0240	0,0303	0,148	–
1,72	у природному стані $W=0,14$	0,0063	0,0158	0,0211	0,0243	0,0297	0,0337	–	15,78
	у водонасиченому стані $W_{sat}=0,26$	0,0123	0,0231	0,0288	0,0354	0,0431	0,0475	–	8,88
	відносне просідання	0,006	0,0073	0,0077	0,0111	0,0134	0,0138	0,190	–

За допомогою визначення межі текучості  $W_l$  (від 0,23 до 0,26) та межі розкочування  $W_p$  (від 0,20 до 0,22) встановлено число пластичності  $I_p$  за формулою:

$$I_p = W_l - W_p \quad (5.9)$$

яке дорівнює 0,04, тобто по відповідній класифікації – даний лесовий ґрунт – супісок, який знаходиться у твердому стані, оскільки  $W_e=0,14 < W_p=0,20$ , або за формулою:

$$I_l = \frac{W_e - W_p}{W_l - W_p} \quad (5.10)$$

його показник текучості  $I_l < 0$ , тому що  $\frac{0,14 - 0,20}{0,24 - 0,20} = -1,5 < 0$ .

Деформаційні характеристики лесових ґрунтів визначались за допомогою компресійних випробувань, використовуючи метод «двох кривих». За допомогою цього методу можна визначити: відносну стисливість  $\varepsilon$  лесових ґрунтів у природному стані; відносну стисливість  $\varepsilon_{\text{sat}}$  при замочуванні; відносне просідання, яке дорівнює  $\varepsilon_{\text{sl}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{sat}}$ , а також компресійний модуль деформації лесових ґрунтів у природному стані  $E_k$  та у водонасиченому стані  $E_{\text{ksat}}$  та коефіцієнт мінливості стисливості  $\alpha = \frac{E_k}{E_{\text{ksat}}}$ .

За отриманими результатами компресійних випробувань були побудовані графіки відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів різної щільності, які відображені на рисунках 5.10 – 5.12.

Як видно з таблиці 5.5 при збільшенні щільності лесового ґрунту, дещо підвищується модуль загальної деформації. Так, при щільності  $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$  модуль загальної деформації становить  $E = 13,36 \text{ МПа}$  для лесових ґрунтів у природному стані і  $E = 7,5 \text{ МПа}$  – у водонасиченому; при щільності  $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$  модуль загальної деформації становить відповідно  $13,36 \text{ МПа}$  і  $7,74 \text{ МПа}$  у природному та водонасиченому станах, а при щільності  $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$  модуль загальної деформації збільшується до  $E = 15,78 \text{ МПа}$  для лесових ґрунтів у природному стані і до  $E = 8,88 \text{ МПа}$  у водонасиченому стані.

Також, при збільшенні щільності лесового ґрунту, збільшується початковий тиск просідання, який відповідно становить:  $0,095$ ;  $0,148$ ;  $0,19 \text{ МПа}$  при щільності лесового ґрунту –  $1,58$ ;  $1,62$ ;  $1,72 \text{ г/см}^3$ .

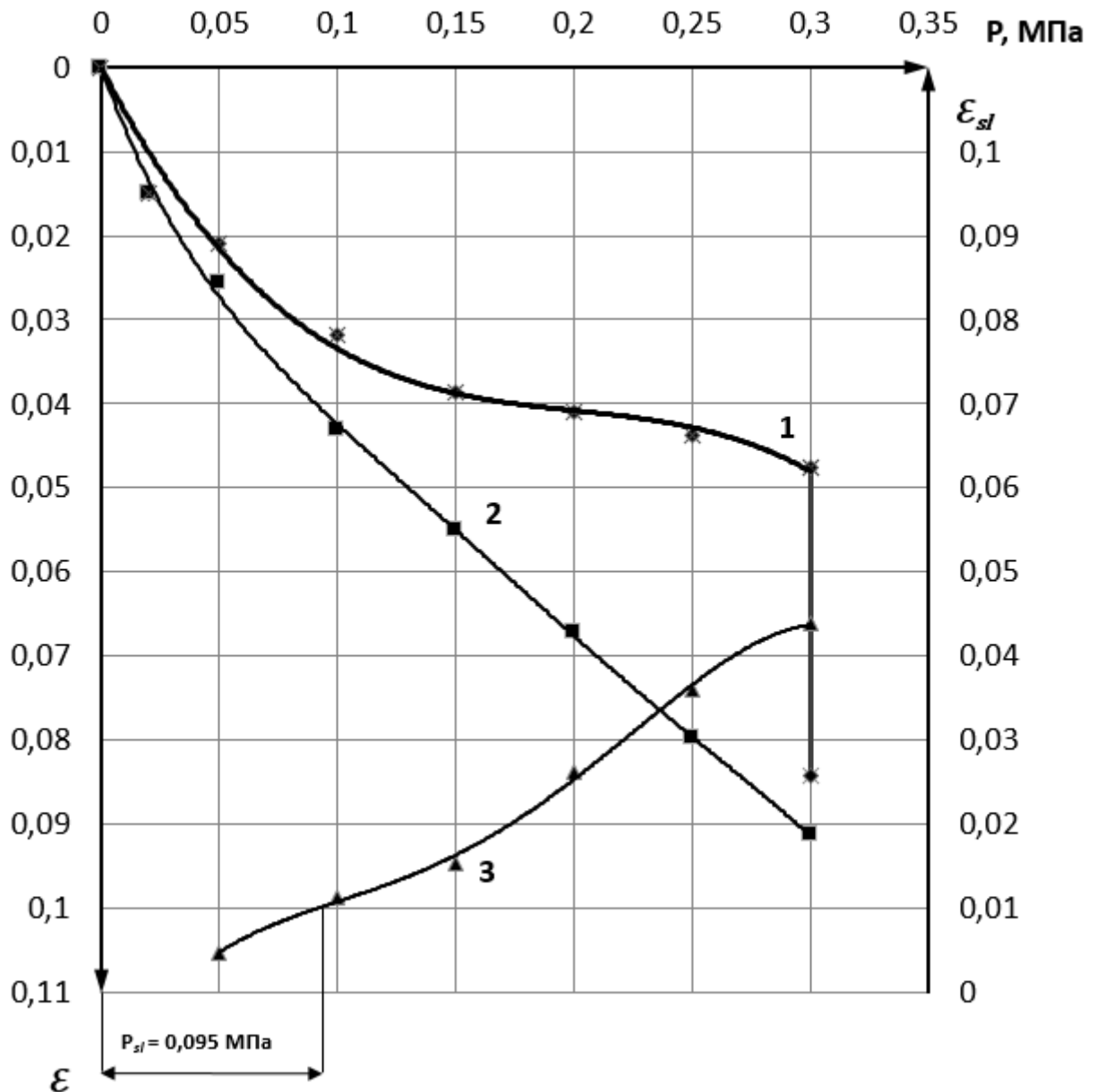


Рисунок 5.10 – Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю  $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$  за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту;  $p_{sl}$  – початковий просадний тиск

Із проведених нами досліджень початкової (критичної) вологості просадки (рисунок 5.13) за компресійними кривими було визначено модуль деформації, підраховано модуль загальної деформації при різних щільностях лесових ґрунтів (таблиці 5.5) та побудовано залежності початкової (критичної) вологості від

тиску (рисунок 5.14) і відносного просідання від вологості для тисків 0,15; 0,2; 0,25 та 0,3 МПа (рисунок 5.15).

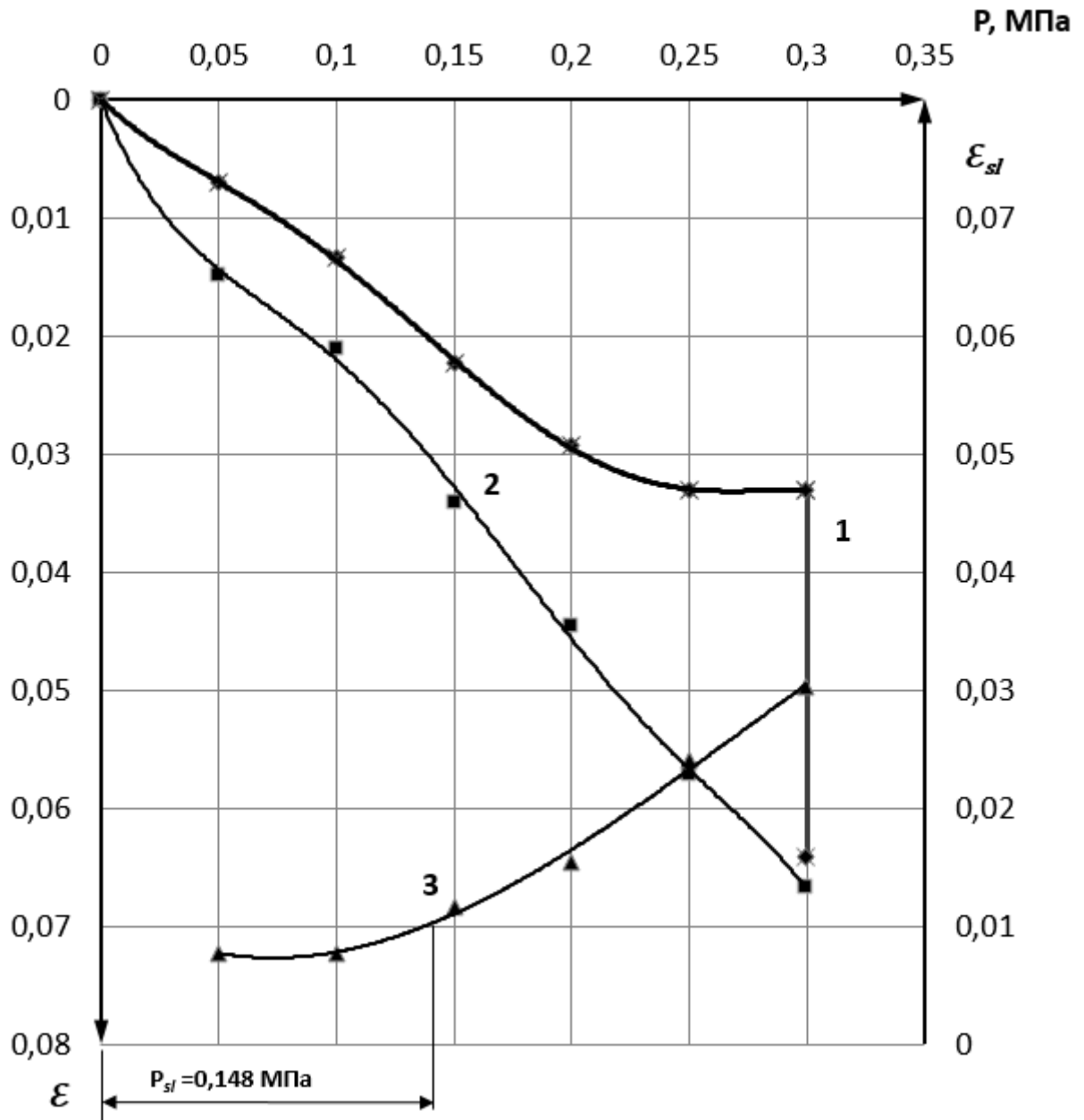


Рисунок 5.11 – Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю  $\rho = 1,62$  г/см<sup>3</sup> за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту;  $p_{sl}$  – початковий просадний тиск

З отриманих графіків (рисунок 5.10 – 5.12) видно, що зі збільшенням щільності лесових ґрунтів, зменшується їхня відносна стисливість та відносне

просідання. Так, при щільності лесових ґрунтів  $\rho = 1,58 \text{ г/см}^3$  (рисунок 5.12), відносна стисливість становить 0,0318; 0,0409; 0,0475 та відносне просідання 0,0113; 0,0263; 0,0438 відповідно при вертикальному навантаженні 0,1; 0,2; 0,3 МПа.

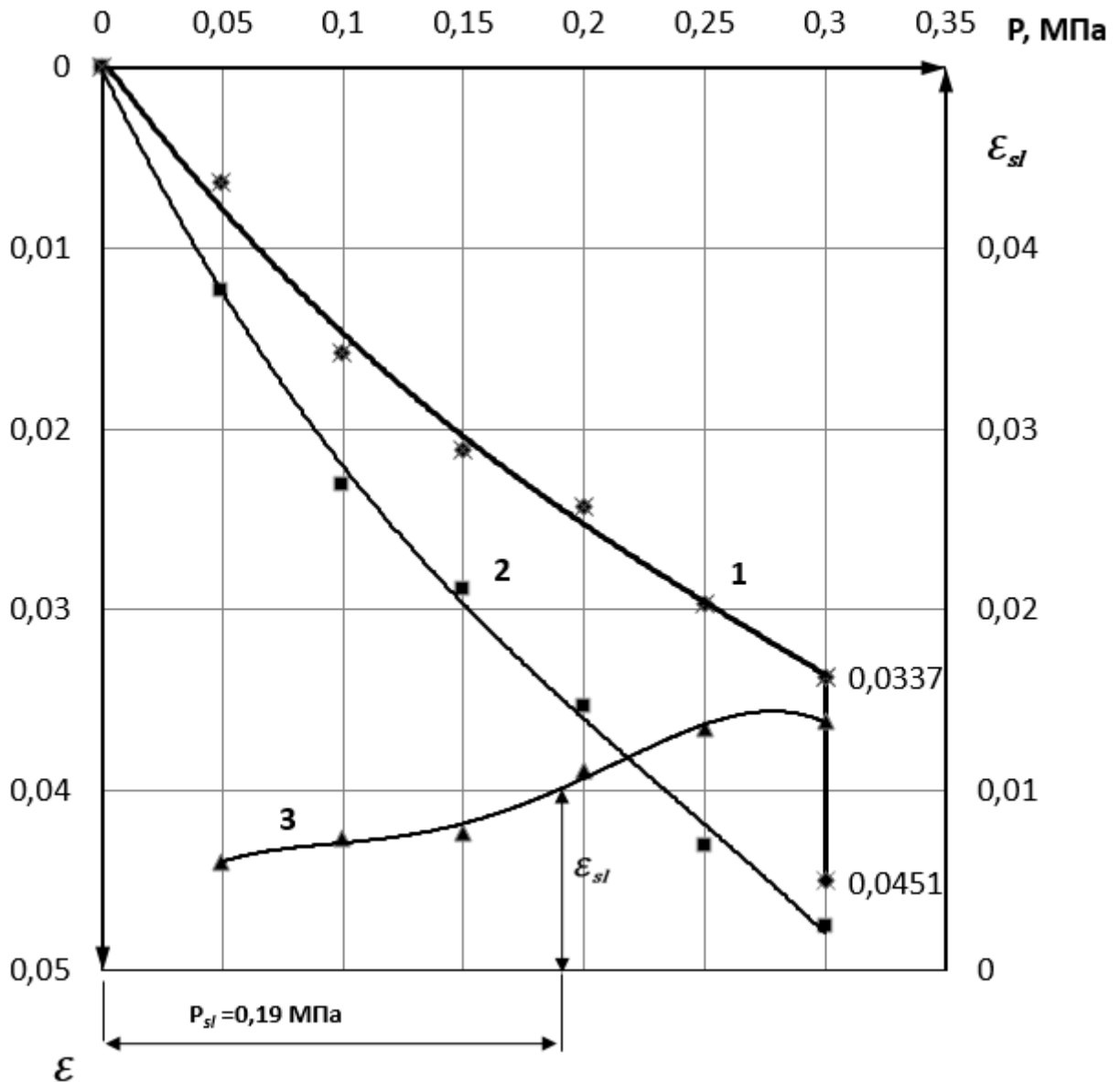


Рисунок 5.12 – Залежність відносної стисливості та відносного просідання від тиску для лесових ґрунтів зі щільністю  $\rho = 1,72 \text{ г/см}^3$  за схемою «двох кривих»: 1, 2 – відповідно, відносне стискання ґрунту з природною вологістю та у водонасиченому стані; 3 – відносне просідання ґрунту;  $p_{sl}$  – початковий просадний тиск



При щільності лесових ґрунтів  $\rho = 1,62 \text{ г/см}^3$  (рисунок 5.11) ці значення дещо менші, а саме, відносна стисливість становить 0,0134; 0,0293; 0,0364 та відносне просідання 0,0077; 0,0154; 0,0303 при вертикальному навантаженні 0,1; 0,2; 0,3 МПа.

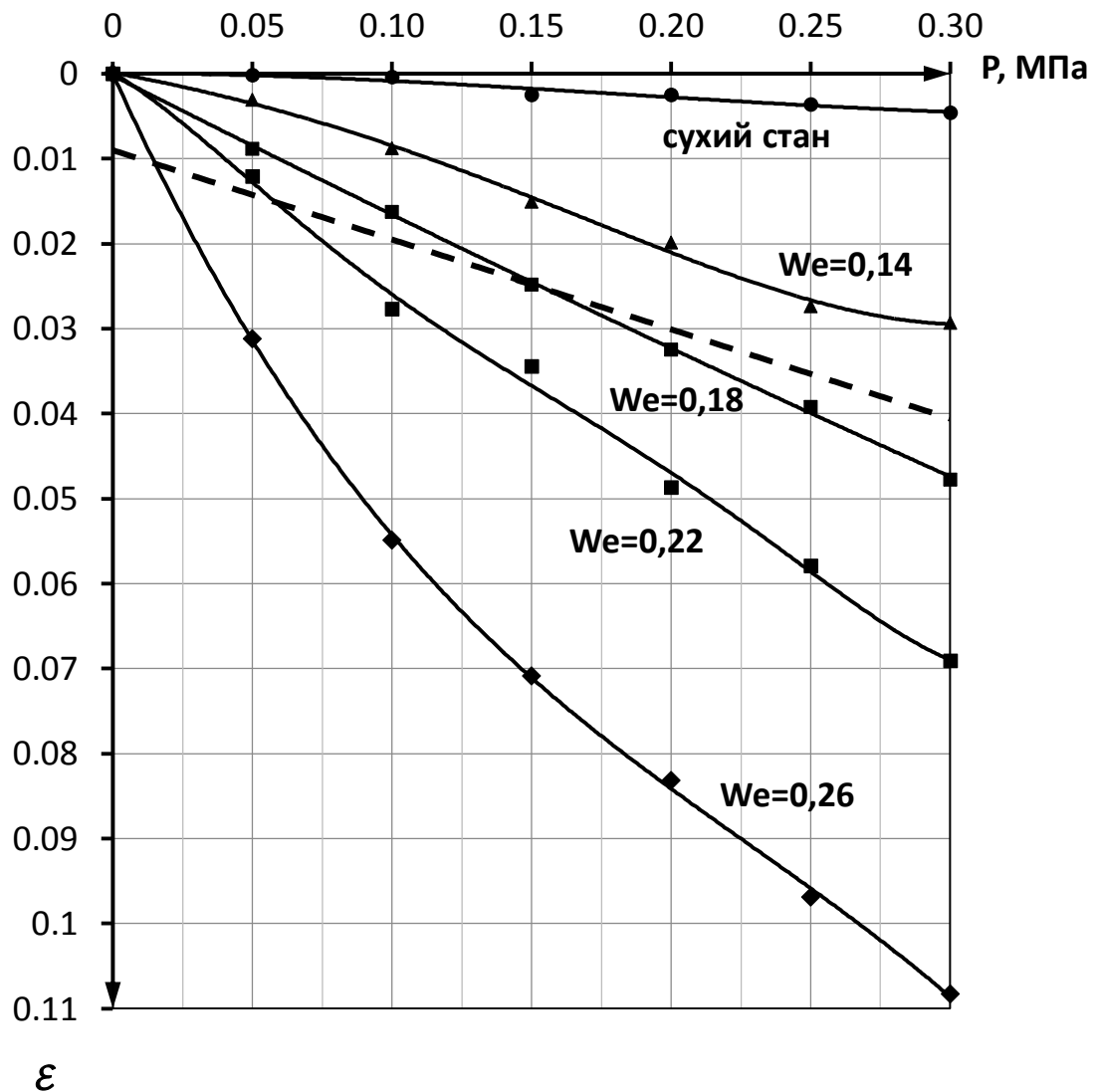


Рисунок 5.13 – Графік залежності відносного стиснення лесового ґрунту при різних вологості від тиску. Пунктиром нанесена допоміжна крива, яка відповідає  $\varepsilon_{sl} = 0,01$

Найменші значення відносної стисливості 0,0158; 0,0243; 0,0337 та відносного просідання 0,0073; 0,0111; 0,0138 при вертикальному навантаженні

відповідно 0,1; 0,2; 0,3 МПа отримано при щільності лесових ґрунтів  $\rho = 1,72$  г/см<sup>3</sup> (рисунок 5.12).

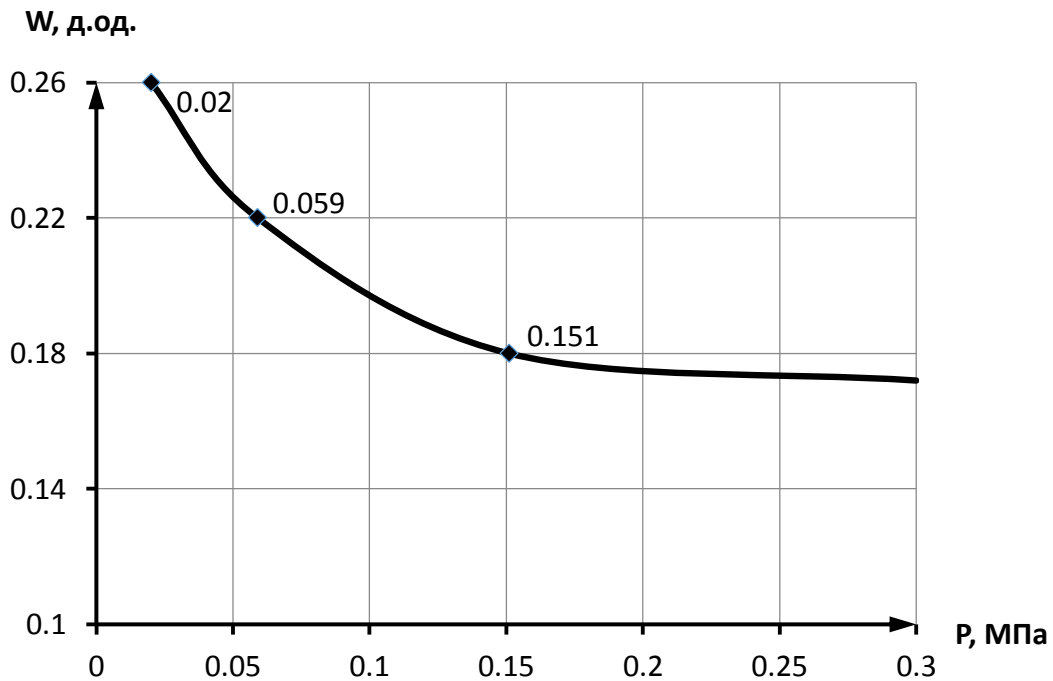


Рисунок 5.14 – Графік залежності початкової (критичної) вологості лесового ґрунту від тиску

З рисунків 5.13 – 5.15 видно, що при вологості лесового ґрунту від природного стану ( $W_e = 0,14$ ) і до вологості на межі розкочування ( $W_p = 0,20$ ) відносне стиснення знаходиться в межах 0,03 – 0,055, а при вологості лесового ґрунту на межі текучості ( $W_l = 0,23 – 0,26$ ), тобто, при повному водонасиченні, відносне стиснення становить, 16.

Початкова (критична) вологість настає при насиченні лесового ґрунту водою 17 % і більше, тобто при ( $W \geq 0,17$ ).

Відносне просідання поступово збільшується при вологості лесового ґрунту ( $W = 0,14 \div 0,22$ ) і знаходиться в межах: 0,0151 – 0,0344; 0,0199 – 0,0487; 0,0277 – 0,0579; 0,0293 – 0,0691 відповідно до вертикального навантаження в 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа. При подальшому зволоженні ґрунту до повного його водонасичення спостерігається значне зростання відносного просідання, яке

становить: 0,0709; 0,0832; 0,0969; 0,1083 відповідно до вертикального навантаження в 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа.

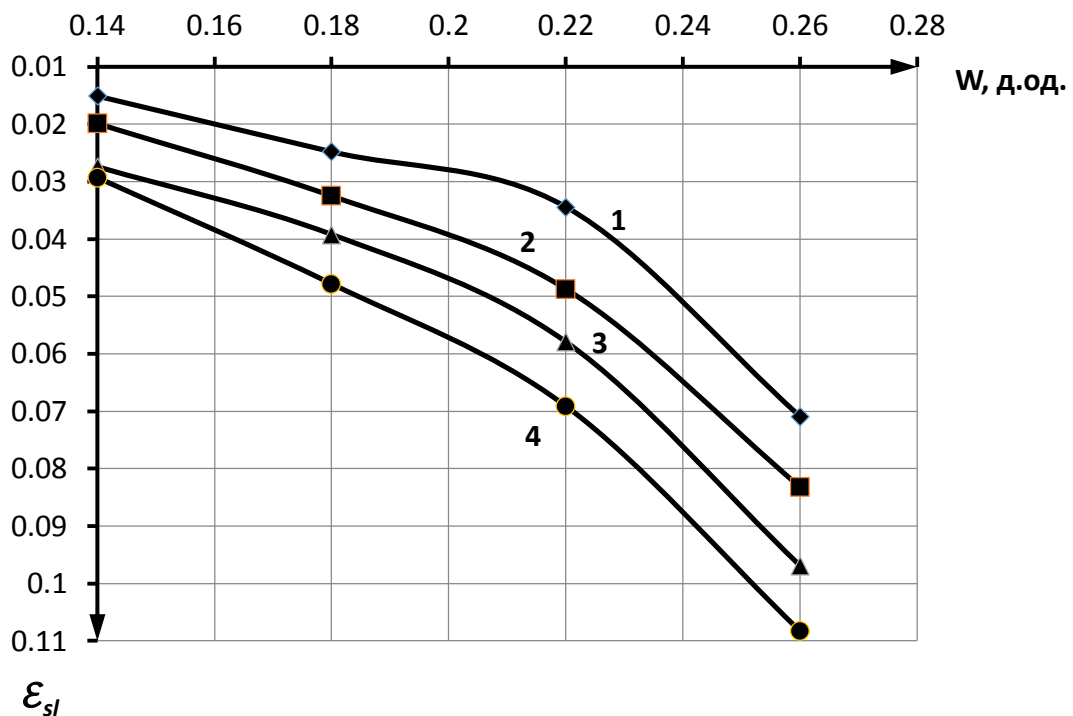


Рисунок 5.15 – Графік залежності відносного просідання від вологості лесового ґрунту: 1, 2, 3, 4 – відповідно при тисках 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа

Отримані результати компресійних досліджень свідчать про те, що щільність значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості лесових ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів.

Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого, дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних лесових ґрунтів.

### 5.3 Розробка пристроїв і способу приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції

На сьогодні виробництво вибухових речовин (ВР) зосереджено на спеціальних підприємствах, що значно збільшує вартість внаслідок навантажувально-розвантажувальних робіт, транспортування і забезпечення безпеки при зберіганні і транспортуванні, збільшення часу між виробництвом та використанням вибухової речовини. Тому при ущільненні структурно-нестійких просадних ґрунтів у міських умовах і на гірничих підприємствах відкритого типу доцільно виготовляти вибухові речовини безпосередньо на місцях проведення вибухових робіт. Їх прийнято називати вибуховими речовинами місцевого приготування [87].

Майже всі промислові ВР є сумішевими системами. Основу вибухових сумішей становлять базові речовини, які можуть бути вибуховими вже в початковому стані, як наприклад, в сумішах на основі тротилу, гексогену, октогену тощо або окислювачами, як це реалізовано в сумішах на основі аміачної селітри. Додаткові компоненти до основних речовин в сумішевих системах виконують роль базових або додаткових горючих (окислювачів).

Водонаповнені спінені вибухові композиції на основі аміачної селітри, поверхнево-активних речовин (ПАР) і води призначалися для ведення робіт в гірничорудній промисловості в шпурових і накладних зарядах незначної площі при руйнуванні негабариту і видобутку штучного каменю.

Спосіб приготування спіненої вибухової композиції цього типу полягає у змішуванні ПАР з водою, а потім з аміачною селітрою механічним шляхом, що призводить до спінення суміші. Час перемішування становить 15–25 хв [133].

До недоліків відомого способу відноситься низька продуктивність і зниження рівня безпеки робіт при накопиченні значних об'ємів готового продукту для великих зарядів.

Метою цього винаходу є інтенсифікація процесу аерації великих об'ємів продукту і підвищення безпеки робіт.

Поставлені цілі досягаються тим, що механічне змішування розчину ПАР і аміачної селітри проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежекування повітря потоком суміші з прямоточною видачею спіненої вибухової композиції до місця застосування.

Цим досягається підвищення безпеки робіт, оскільки неспінена суміш розчину ПАР і аміачної селітри не чутлива до удару і тертя, а вибухові властивості цієї суспензії проявляються тільки після насичення суміші бульбашками повітря при виході потоку піносуспензії з ежектора. Ежекторний прямоточний метод дозволяє виробляти значні об'єми спіненого вибухового композиту [67].

Зазначений спосіб здійснюється за допомогою пристрою, що включає бункер аміачної селітри, ємностей ПАР, води і розчину ПАР, механічний змішувач, і відрізняється тим, що він містить низькошвидкісний механічний змішувач, накопичувальну ємність, насос, сопло, ежектор, вентиль-тримач повітря і пінний ствол.

На рисунку 5.16 наведено загальний вигляд пристрою для приготування водонаповненої вспіненої вибухової композиції.

Пристрій містить бункер аміачної селітри 1, ємність ПАР 2, ємність води 3, ємність водного розчину ПАР 4, низькообертовий механічний змішувач 5, накопичувальну ємність суспензії 6, насос 7, сопло 8, ежектор 9, вентиль-дозатор повітря 10, пінний ствол 11.

Пристрій працює наступним чином. Селітра з бункера 1 надходить в змішувач 5, в який дозується розчин ПАР з ємності 4. Готова суспензія надходить у накопичувальну ємність 6. Насосом 7 суспензія при необхідності подається під тиском в сопло 8. Швидкісний потік суспензії надходить в ежектор 9 і засмоктує повітря, що надходить з атмосфери через вентиль-дозатор 10. Потік аерується, тобто насичується вискодисперсними бульбашками повітря. Отримана піносуспензія надходить у пінний ствол 11 і вже, як спінена вибухова композиція, подається безпосередньо до місця ведення вибухових робіт.

Пропонований високоефективний спосіб і пристрій для його здійснення дозволяє розширити області цієї технології на наступні сфери.

Розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100 – 200 м. за один цикл з покриттям шару піносуспензії 50 – 70 мм. смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою детонаційного шнура (ДШ). За один цикл обробляється площа землі до 1000 м<sup>2</sup>.

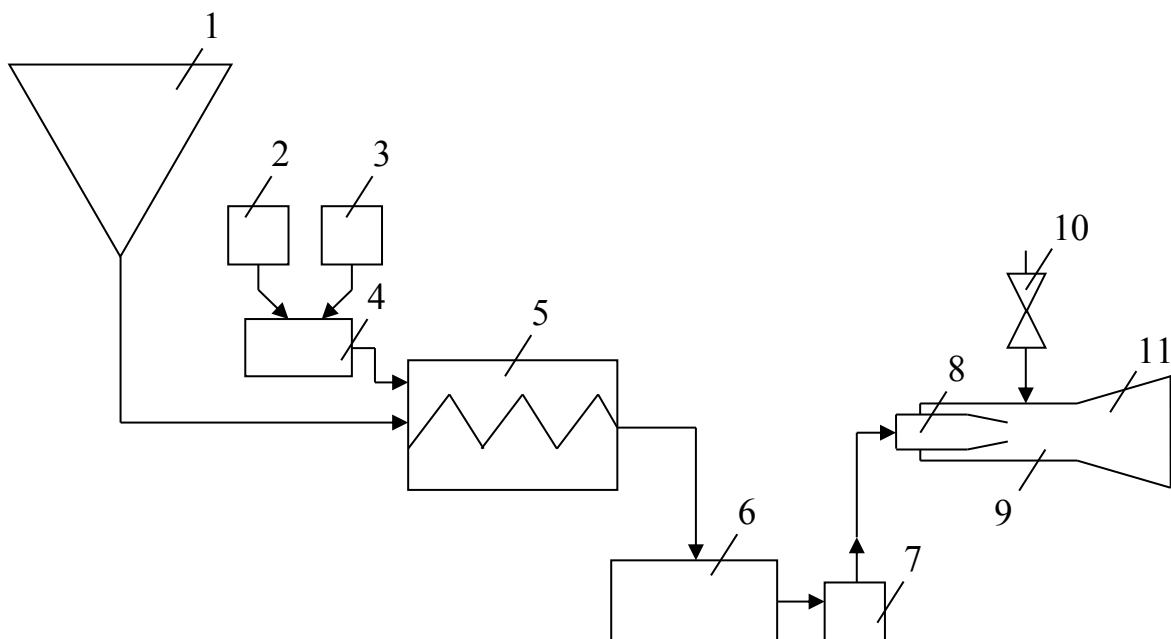


Рисунок 5.16 – Загальний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції: 1– бункер аміачної селітри, 2 – ємність ПАР, 3 – ємність води, 4 – ємність водного розчину ПАР, 5 – низькообертовий механічний змішувач, 6 – накопичувальна ємність суспензії, 7 – насос, 8 – сопло, 9 – ежектор, 10 – вентиль-дозатор повітря, 11 – пінний ствол

Розмінування пересіченої місцевості шляхом створення заряду об'ємного вибуху за допомогою пінного ствола, заповненням піносуспензією виїмки в ґрунті або м'якій оболонці і підривом такого заряду нитками ДШ.

Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів злітних смуг на польових аеродромах шляхом перенасичення пінного ствола уздовж злітної смуги з

покриттям шару піносуспензії 50 – 100 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і підривом вибухового композиту ниткою ДШ.

Для підвищення фізичної стабільності спіненого вибухового композиту в четвертому розділі розглянуто доцільність застосування у складі спінених ВР добавки алюмінію, в якості дисперсного компоненту, і цим досягти проникнення рідкої фази у мікротріщини селітри із-за відсутності ефекту розклинювання.

Приготування таких спінених вибухових композицій можна за рахунок запропонованого способу, що включає механічне змішування розчину ПАР, аміачної селітри, гранули якої попередньо оброблені ультразвуком та подрібнено на дробарці з добавкою 3–4% дисперсного алюмінію, яке проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією його за рахунок ежектування повітря потоком суміші з прямоточною видачею спіненої вибухової композиції до місця застосування.

Для приготування таких спінених вибухових композицій запропоновано пристрій (рисунок 5.17), що включає в себе: бункер 1 і дробарку для подрібнення гранульованої аміачної селітри 2, ємність ПАР 3, ємність води 4, ємність з алюмінієвою пудрою 5, ємність водного розчину ПАР 6, низькообертовий механічний змішувач 7, накопичувальну ємність суспензії 8, насос 9, сопло 10, ежектор 11, вентиль-дозатор повітря 12, пінний ствол 13 [134].

Пристрій працює наступним чином. Гранульована аміачна селітра попередньо оброблена ультразвуком з бункера 1 і дробарки 2 надходить в змішувач 7, в який дозується розчин ПАР з ємності 6 та алюмінієва пудра з ємності 5. Готова суспензія надходить у накопичувальну ємність 8. Насосом 9 суспензія при необхідності подається під тиском в сопло 10. Швидкісний потік суспензії надходить в ежектор 11 і засмоктує повітря, що надходить з атмосфери через вентиль-дозатор 12. Потік аерується, тобто насичується високодисперсними бульбашками повітря. Отримана піносуспензія надходить у пінний ствол 13 і вже, як спінена вибухова композиція, подається безпосередньо до місця ведення вибухових робіт.

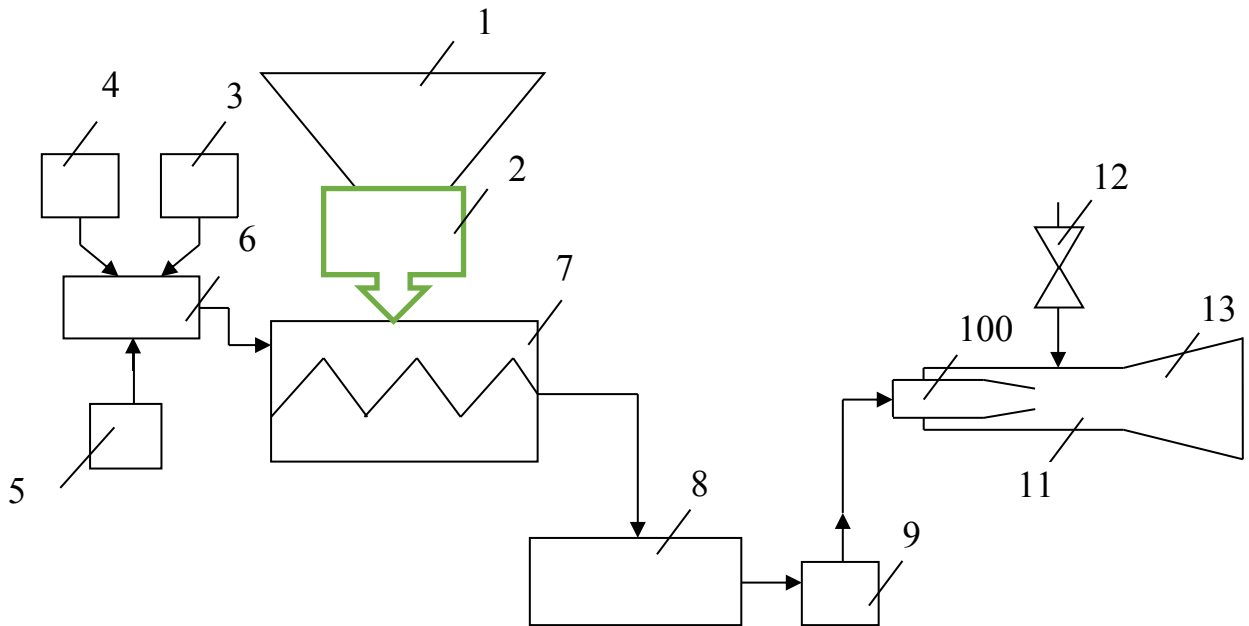


Рисунок 5.17 – Загальний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції: 1– бункер аміачної селітри, 2 – дробарка для подрібнення гранульованої аміачної селітри, 3 – ємність ПАР, 4 – ємність води, 5 – ємність з алюмінієвою пудрою, 6 – ємність водного розчину ПАР, 7 – низькообертовий механічний змішувач, 8 – накопичувальна ємність суспензії, 9 – насос, 10 – сопло, 11 – ежектор, 12 – вентиль-дозатор повітря, 13 – пінний ствол

За рахунок попередньої обробки АС ультразвуковим випромінюванням та добавкою 3–4 % дисперсного алюмінію можна досягти значної фізичної стабільності та покращити динамічні характеристики запропонованих спінених вибухових композицій. За допомогою запропонованого пристрою забезпечується значна безпека проведення безпосередньо самих вибухових робіт, оскільки не спінена суміш розчину ПАР і аміачної селітри не чутлива до удару і тертя, а вибухові властивості цієї суспензії проявляються тільки після насичення суміші бульбашками повітря при виході потоку піносуспензії з ежектора [84].

Крім того, ежекторний прямоточний метод дозволяє виробляти значні об'єми спіненого вибухового композиту.



Для підвищення стійкості системи та детонаційних характеристик ВС даного типу запропоновано її обробку ультразвуковим випромінюванням безпосередньо на місці приготування.

Даний винахід відноситься до способів приготування промислових мало щільних вибухових складів (ВС), призначених для проведення вибухових робіт в будівельній та гірничорудній промисловості.

Суміш аміачної селітри (АС) і поверхнево-активних речовин (ПАР) є тонко дисперсною суспензією, в якій АС є дисперсною фазою, а розчин ПАР і частини селітри - дисперсним середовищем. Насичення суспензії бульбашками повітря сенсibiliзує систему.

Метою даного винаходу є створення такого способу, який би сприяв приготування ВС з поліпшеними детонаційними характеристиками і забезпечував безпеку робіт. При цьому підвищується повнота детонації, зменшується критичний діаметр, що знижує ймовірність відмов зарядів.

Відмітна особливість способу полягає в тому, що поліпшення детонаційних характеристик ВС і підвищення безпеки досягається шляхом впливу на вихідну суспензію до процесу її спінювання ультразвуком (УЗ) з інтенсивністю коливань вище кавітаційного порогу в оброблювальному середовищі.

Даний спосіб приготування малощільних вибухових складів на основі аміачної селітри і поверхнево-активних речовин, що включає подрібнення селітри і змішування її з ПАР, який відрізняється тим, що, з метою поліпшення детонаційних характеристик і підвищення безпеки, на вихідну суспензію АС/ПАР до процесу її спінювання впливають ультразвуком з інтенсивністю коливання вище кавітаційного порога в оброблювальному середовищі.

Даний пристрій включає бункер подрібненої аміачної селітри, ємності ПАР, ємність води, ємність розчину ПАР, лопатевої змішувач, патрубок готового продукту, що відрізняється тим, що корито лопатевого змішувача забезпечено ультразвуковими випромінювачами.

Ультразвуковий пристрій (рисунок 5.18) працює таким чином. У змішувач при перемішуванні дозовано потрапляють селітра і розчини ПАР, причому перемішування проводять без спінування суспензії. Потім включають УЗ випромінювачі з інтенсивністю коливань вище кавітаційного порогу в оброблювальному середовищі.

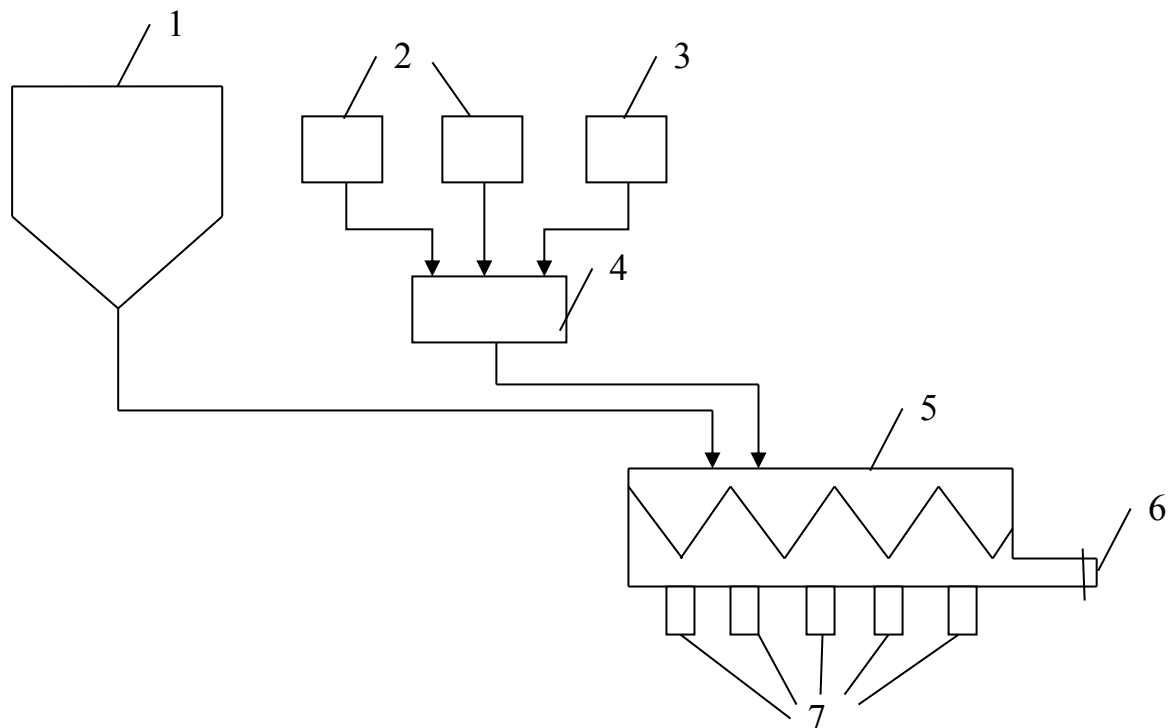


Рисунок 5.18 – Загальний вигляд пристрою для приготування водонаповненої спіненої вибухової композиції, обробленої ультразвуковим випромінюванням: 1 – бункер подрібненої АС; 2 – ємність ПАР; 3 – ємність води; 4 – ємність водного розчину ПАР; 5 – лопастний змішувач; 6 – патрубок готового продукту; 7 – УЗ випромінювачі

Після УЗ обробки суспензії змішувач переводять в режим спінування і доводять щільність ВС до необхідних величин ( $0,3\text{--}0,8\text{ г/см}^3$ ). Готовий продукт видається через патрубок 6.

Для перевірки вибухових характеристик були виготовлені зразки ВС відомого складу: АЕРОЛА 4–8%, водний розчин сульфатно-спиртової барди 1–3 % -ої концентрації, аміачна селітра – інше (88–94,5 %). Суміші АС/ПАР оброблялися протягом 5–20 хвилин, дані яких наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Характеристики ВС після обробки ультразвуковим випромінюванням

Характеристики	Контрольні зразки	Дослідні зразки			
		Час обробки УЗ, хв.			
		5	10	15	20
Щільність, г/см <sup>3</sup>	0,6-0,8	0,6-0,8	0,6-0,8	0,5-0,8	0,5-0,8
Критичний діаметр, мм:					
- відкритого заряду	50-80	50-70	45-60	45-50	40-50
-в жорсткій оболонці	30-35	30-35	25-35	25-35	20-25
Мінімальний ініціюючий імпульс:					
- відкритого заряду	10-20 г ТНТ	10-20 г ТНТ	10-15 г ТНТ	2 нити ДШ	1 нить ДШ
-в жорсткій оболонці	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8	ЭД-8

З наведених у таблиці даних видно, що після обробки УЗ протягом 5, 10, 15 та 20 хвилин критичний діаметр відкритого заряду зменшується з 50–80 мм відповідно до 50–70, 45–60, 45–50 та 40–50 мм, а в зарядах в твердій оболонці зменшується з 30–35 мм відповідно до 30–35, 25–35, 25–35 та 20–25 мм. Мінімальний ініціюючий імпульс для відкритого заряду також зменшується. Замість 10–20 г ТНТ досить застосовувати 1–2 нитки ДШ, що технологічно дуже зручно.

Оброблені УЗ випромінюванням зразки селітри вивчалися під електронним мікроскопом і рентгеноструктурним методом, і встановлено, що коливання викликають накопичення дефектів структури селітри.

Це пояснює підвищення чутливості оброблених сумішей до ініціювання імпульсу.

Отже, наведені вище пристрої, дозволяють виготовляти водонаповнені спінені вибухові композиції місцевого приготування, як з попередньо обробленою АС ультразвуком, так і саму суспензію до процесу її спінювання. Крім того, забезпечують можливість застосування добавки дисперсного компоненту у вигляді алюмінію.

#### 5.4 Техніко – економічні рекомендації ущільнення структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху

Наведемо рекомендації інженерних методів розрахунку параметрів технологічних схем ліквідації просідання структурно-нестійких ґрунтів вибуховим способом.

При ліквідації просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів за допомогою групи циліндричних зарядів виникає необхідність обґрунтованого вибору кроку розташування вибухових свердловин для досягнення рівномірного і ефективного ущільнення ґрунту по всій глибині просадного масиву [135].

У разі, коли для буріння свердловин застосовується стандартні шнеки, діаметр (радіус) заряду залежить від діаметра шнека є заздалегідь заданою величиною тому розглянемо розрахунок кроку сітки розташування свердловин при заданому радіусі заряду ВР. При розрахунку кроку  $a$  розташування свердловин будемо виходити з умов руйнування лесового масиву при дії групи циліндричних зарядів. Під час дії циліндричного заряду генерується хвиля напружень, радіальну складову якої можна викласти в наступному аналітичному вигляді:

$$\sigma_{r(R,t)} = \sigma_r^m(R) \exp[-0(t - t_m)] \frac{\sin \beta(t - t_0)}{\sin \beta(t_m - t_0)} \quad (5.11)$$

Залежність максимальних деформацій від відстані може бути представлена у вигляді:

$$E_m = k_{\Theta} R_0^{-\mu_{\Theta}} \quad (5.12)$$

де  $k_{\Theta}$  і  $\mu_{\Theta}$  – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом для певного виду ґрунту.

Розглянемо дію двох зарядів ВР, що одночасно підриваються. Для цього скористаємося критерієм руйнування середовища Тріска - Сен-Венана:

$$(\sigma_y - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xy}^2 \geq \sigma_s^2 \quad (5.13)$$

де  $\sigma_s$  – межа структурної міцності лесового ґрунту.

При дії вибуху  $n$  зарядів сумарне поле напружень визначається наступними формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \cos^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \sin^2 \alpha_i) \\ \sigma_y &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} \sin^2 \alpha_i + \sigma_{i\alpha} \cos^2 \alpha_i) \\ \tau_{xy} &= \sum_{i=1}^n (\sigma_{ir} - \sigma_{i\alpha}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i\end{aligned}\quad (5.14)$$

При дії двох зарядів  $i=2$ . Беручи до уваги, що в ґрунтах тангенційна складова напружень знаходиться в наступній залежності з радіальною:

$$\sigma_{\alpha(R,t)} = k_\tau \sigma_r(R,t) \quad (5.15)$$

Та з огляду на тригонометричні співвідношення для синуса і косинуса подвійного кута, з формули (5.14) отримаємо:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{1}{2} [1 + k_\tau + (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_1] \sigma_{1r} + \frac{1}{2} [1 + k_\tau + (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_2] \sigma_{2r} \\ \sigma_y &= \frac{1}{2} [1 + k_\tau - (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_1] \sigma_{1r} \\ &\quad + \frac{1}{2} [1 + k_\tau - (1 - k_\tau) \cos 2\alpha_2] \sigma_{2r} \\ \tau_{xy} &= \frac{1}{2} (1 - k_\tau) (\sigma_{2r} \sin 2\alpha_2 - \sigma_{1r} \sin 2\alpha_1)\end{aligned}\quad (5.16)$$

Уявімо вираз 5.13 і співвідношення 5.16 та після нескладних перетворень отримаємо рівність:

$$(1 - k_\tau)^2 [\sigma_{1r}^2 + \sigma_{2r}^2 + 2\sigma_{1r}\sigma_{2r}\cos(2\alpha_1 + 2\alpha_2)] = \sigma_s^2 \quad (5.17)$$

Ця рівність визначає зону руйнування масиву лесового ґрунту товщиною  $H$  при впливі на нього двох циліндричних зарядів.

Оскільки ми розглядаємо одночасне підривання вибухових зарядів, то  $R_1 = R_2 = R$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ . Кут  $\alpha$  в цьому випадку буде визначатися за формулою:

$$\alpha = \arccos \frac{a}{2R} \quad \text{де } R = \sqrt{\frac{a^2}{4} + H^2}$$

З урахуванням цих зауважень умова 5.17 буде мати вигляд:

$$(1 - k_\tau)^2 \frac{4k_\sigma^2}{r_3 - 2\mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} + H^2\right)^{-2-\mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} - H^2\right)^2 = \sigma_s^2, \text{ або}$$

$$\frac{2k_\sigma(1-k_\tau)(H^2 - \frac{a^2}{4})}{r_3 - \mu_\sigma} \left(\frac{a^2}{4} + H^2\right)^{\frac{-2-\mu_\sigma}{2}} = \sigma_s \quad (5.18)$$

Приймаючи у формулі 5.18, що  $H=3/2a$ , тобто, що на глибині  $H$  просадного лесового масиву сформувався плоский фронт, отримаємо рівняння щодо вихідного параметра  $a$ :

$$\frac{1-k_\tau}{r_3 - \mu_\sigma} 4a^2 k_6 (0.4a)^{\frac{\mu_\sigma-2}{2}} = \sigma_s \quad (5.19)$$

З співвідношення 5.19 неважко визначити необхідний параметр  $a$ :

$$a = 0,6r_3 \left[ \frac{1.6k_\sigma(1-k_\tau)}{\sigma_s} \right]^{1/\mu_\sigma} \quad (5.20)$$

Для лесових ґрунтів коефіцієнт  $k_\tau$  знаходиться в межах  $k_\tau=0.3\div 0.4$ .

Відзначимо, що використання при розрахунку параметра  $a$  критерію формування плоского фронту дозволяє отримати рівномірний розподіл поля напружень в ґрунтовому масиві і тим самим досягти його рівномірного осідання по глибині.

Таким чином, знаючи для конкретних ґрунтових умов експериментальні коефіцієнти  $k_\sigma$  і  $\mu_\sigma$ , можна призначити крок розташування вибухових свердловин.

Визначити необхідний радіус заряду, що забезпечує просідання заданої товщі масиву  $H$ , можна за формулою [126]:

$$r_3 = H \left( \frac{\sigma_s}{k_\sigma} \right)^{1/\mu_\sigma}, \text{ м} \quad (5.21)$$

Як зазначалося вище, для ущільнення поверхневої товщі лесового ґрунту застосовуються технологічні схеми з використанням плоских зарядів, або їх групи циліндричних зарядів під заданим кутом [136]. Цікавим є отримати формулу для визначення маси плоского заряду, необхідного для ущільнення заданої товщі ґрунту. Будемо виходити із відомої закономірності деформування лесового ґрунту при впливі на нього плоского заряду (5.12). Якщо задати в цій залежності необхідну деформацію  $\varepsilon_k$ , отримаємо:

$$Q = H \left( \frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta}, \text{ кг/м}^2 \quad (5.22)$$

де  $H$  – товщина просадного шару;  $k_\theta$ ,  $\mu_\theta$  – експериментальні коефіцієнти, які характеризують закономірності деформування лесового ґрунту;  $\varepsilon_k$  – задана деформація, до котрої необхідно ущільнювати лесовий ґрунт.

У випадку групи похилих циліндричних зарядів необхідно знати погонні витрати ВР. Припустимо, що потрібно ущільнити ділянку шириною  $b$  і довжиною  $l$  циліндричними похилими зарядами при погонних витратах ВР ( $q$ ) [137].

Тоді загальну масу необхідної кількості ВР можна визначити за формулою:

$$C = lqn \quad (5.23)$$

Кількість ВР, необхідної для ущільнення одиниці площі, визначається за формулою:

$$Q = \frac{lqn}{bl} = \frac{qn}{b} \quad (5.24)$$

З іншої сторони, при ущільненні цієї ділянки просадного масиву плоским зарядом для визначення маси заряду маємо формулу (5.22). Прирівнюємо вирази (5.22) та (5.24) отримаємо:

$$H \left( \frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta} = \frac{qn}{b} \quad (5.25)$$

Звідки визначаємо величину  $q$

$$q = \frac{Hb}{n} \left( \frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta} \quad (5.26)$$

Відзначимо, що показник  $n$  визначається як ціла частина співвідношення  $b/a$ , де  $a$  – відстань між похилими циліндричними зарядами. Ця відстань визначається з критерію формування плоского фронту і становить  $a=0,5H$ .

Таким чином, формула (5.26) буде мати вигляд:

$$q = 0,5H^2 \left( \frac{\varepsilon_k}{k_\theta} \right)^{1/\mu_\theta}, \text{ кг/м}. \quad (5.27)$$

При проектуванні ущільнення просадних лесових ґрунтів з використанням енергії вибуху необхідно враховувати дані інженерно геологічних і гідрогеологічних досліджень. У числі вихідних даних для проектування, в якості основних характеристик, що враховують чутливість лесового ґрунтового масиву

до динамічних впливів і характер поведінки просадки, необхідно отримати наступні дані:

- тип ґрунтових умов;
- категорію ґрунтів за просіданням;
- фізико-механічні властивості ґрунтів;
- потужність просадної товщі;
- рівень ґрунтових вод і прогноз очікуваної зміни ґрунтових вод;
- граничну структурну міцність ґрунту;
- коефіцієнт фільтрації.

Усунення просадних властивостей структурно-нестійких ґрунтів за допомогою енергії вибуху супроводжується порушенням їхньої структури під дією динамічного навантаження і подальшим ущільненням ґрунтового масиву до досягнення необхідної величини просідання. Форсування процесу ущільнення просадних ґрунтів досягається шляхом спільного впливу попереднього зволоження масиву і подальшого підривання спінених зарядів в масиві. Запропоновані нами технологічні схеми ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів відрізняються від раніше відомих тим, що в них не використовуються обсадні труби, підвищується безпека проведення вибухових робіт і забезпечується рівномірність ущільнення по глибині на необхідну площу ґрунтового масиву. Комплекс технологічних процесів, необхідний при ущільненні просадних ґрунтів, полягає в наступному:

- зняття родючого шару ґрунту на місці проведення робіт;
- визначення вологості і щільності скелета ґрунту в масиві;
- розробка траншей і буріння свердловин в залежності від технологічної схеми (свердловинна, траншейна);
- при необхідності виконати зволоження ґрунту до оптимальної вологості;
- заряджання спіненими ВР свердловини або траншеї за допомогою запропонованих зарядних пристроїв;
- влаштування забивки свердловини або траншеї та ущільнення ґрунтового масиву за допомогою енергії вибухового перетворення.



Зволоження ґрунту в залежності від категорії проводиться з поверхні через траншеї, або через свердловини. Кількість необхідної для замочування води орієнтовно визначається за формулою:

$$G = 1,25(W_0 - W) \frac{\gamma_{ск}}{100} HS \quad (5.28)$$

де  $W_0$  – оптимальна вологість ґрунту, %;  $W$  – природна вологість ґрунту, %;  $\gamma_{ск}$  – щільність скелета ґрунту, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – глибина замочування, м,  $S$  – площа замочування, м<sup>2</sup>.

Технологічна схема ущільнення масиву просадних структурно-нестійких ґрунтів з використанням енергії вибуху вибирається в залежності від потужності просадної товщі, типу ґрунтових умов за просіданням, а в міських умовах і від категорії споруди.

При будівництві на структурно-нестійких ґрунтах легких споруд (додатковий тиск від споруди не перевищує  $5 \cdot 10^4$  Па), а також при невеликій потужності просадної товщі (до 5-10 м) попереднє замочування виконується і спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пройдених траншеях. При потужності просадної товщі від 10 до 20,0 м попереднє замочування виконується і спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пробурених свердловинах. При потужності просадної товщі більше 20 м, доцільно застосування комбіновану схему зволоження, а саме з попередньо пройдених траншей і свердловин, а спінені вибухові заряди розташовуються в попередньо пробурених свердловинах.

В будь-якому випадку, застосування тієї чи іншої технологічної схеми ліквідації просадних властивостей масиву структурно-нестійких ґрунтів встановлюється на основі техніко – економічного обґрунтування можливих варіантів, які враховують характерні особливості споруди та специфіку його експлуатації.

При поверхневому ущільненні структурно-нестійких ґрунтів розрахунок заряду здійснюється за формулою (5.22). Максимальна тривалість попереднього замочування при цьому визначається за формулою:

$$T_{n.з} = K_1 \cdot \frac{H}{K_{min}^B}, \text{ дiб} \quad (5.29)$$

де  $K_{min}^B$  – мінімальна величина коефіцієнта фільтрації в вертикальному напрямку в межах просадної товщі, м/добу;  $K_l$  – коефіцієнт, що враховує клас капітальності споруди, приймається рівним 1,05 – 1,5;  $H$  – потужність товщі просадного масиву лесових ґрунтів.

Підривання зарядів може проводитись із застосуванням короткоуповільненого (КУП) підривання. Уповільнення здійснюються між рядами свердловин. Крайні ряди свердловин вибухають миттєво. Час уповільнення нарощується до центру просадного блоку, причому період уповільнення визначається величиною відстані між рядами і швидкістю фронту вибухової хвилі в конкретному ґрунті:

$$t_{куп} = \frac{r_3}{D} \left( \frac{k_\sigma}{\sigma_s} \right)^{1/\mu_\sigma} \quad (5.30)$$

Для уявлення значимості запропонованих технологічних схем ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів наведемо порівняльну економічну оцінку з існуючими методами.

Визначення економічної ефективності запропонованого в даній роботі нового способу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів з використанням енергії вибуху проведений відповідно до одного з найвідоміших способів закріплення ґрунтового масиву – цементация.

Для розрахунку загальної вартості була прийнята умовна ділянка просадного структурно-нестійкого ґрунту з розмірами в плані 10×10 м та глибиною ущільнення 25 м.

Для усунення просідання ґрунтів за пропонованим способом необхідно виконати наступні роботи: земляні роботи (розробка траншеї) – 10 м<sup>3</sup>; бурові роботи (проходка свердловин діаметром 105 мм) – 6 свердловин по 25 м, тобто 150 п.м; вибухові роботи загальним об'ємом ґрунтового масиву в 2500 м<sup>3</sup>.

Загальна вартість даних видів робіт становить:

Земляні роботи – 45,6 грн.;

Бурові роботи – 7881 грн.;

Вибухові роботи – 17550 грн.

Разом – 25476,6 грн.

Загальна вартість закріплення аналогічної ділянки ґрунтового масиву за допомогою одним з найвідоміших способів закріплення ґрунтового масиву – цементациї становить 37640 грн.

Загальний економічний ефект від впровадження запропонованого способу на ділянці розміром 10×10 м, глибиною просадної товщі 25 м становить 12163,4 грн. або 32,3 % у порівнянні з цементациєю.

Таким чином запропонований спосіб ущільнення структурно-нестійких ґрунтів є більш доступним не тільки в технічному використанні, але і ефективним за економічними показниками.

### **Висновки по розділу 5**

1. Результати проведених експериментів свідчать про те, що малошільні спінені заряди на основі АС/СФ/АП забезпечують ущільнення на глибину 1,5 – 3,0 м, що становить 27-30 потужностей заряду у порівнянні з ігданітом, що забезпечує ущільнення на глибину 1,25 – 2,0 м або 20 – 25 потужностей заряду.

2. При свердловинному способі ущільнення структурно-нестійких ґрунтів оптимальний кут нахилу свердловини, при якому забезпечується найбільш висока щільність просадного ґрунту знаходиться в межах від 20° до 30°. Крім того, при застосуванні малошільної ВР щільність ґрунтового масиву становить  $(1,75 - 1,76) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , а заряди ігданіту забезпечують щільність ґрунту в межах  $(1,55 - 1,63) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

3. Ущільнення ґрунтового масиву накладними зарядами потужністю 50, 75, і 100 мм забезпечує глибину ущільнення малошільною ВР відповідно на 25, 20 і 17 % більше, ніж стандартним ігданітом.

4. Встановлено, що характер ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху носить пульсуючий характер, який затухає по мірі проходження крізь масив. Це обумовлено тим, що під час вибуху, по мірі розповсюдження детонації вздовж заряду, виділяється значна кількість газів, яка діє в глиб ґрунтового

масиву. При цьому утворюється зона ущільнення. Після того, як гази продуктів детонації перестають діяти на ґрунтовий масив, відбувається зворотний ефект, тобто утворюється зона розвантаження, яка призводить до зниження щільності. Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. А це, в свою чергу, призводить до більш тривалої дії газів продуктів детонації на оточуючий масив, а відповідно, і збільшення щільності.

5. Аналіз отриманих даних показує, що об'ємна концентрація енергії в зарядній порожнині при використанні малощільних сумішей нижче, ніж у стандартних ВР, працездатність за методом воронкоутворення і ефективність ущільнення, навпаки, вище у малощільних сумішевих ВР. Це можна пояснити перерозподілом енергії у вибуховому імпульсі за рахунок зниження пікового тиску і збільшення загальної тривалості фази стиснення. Останнє дозволяє зменшити втрати енергії в ближній зоні вибуху на непотрібне переподрібнення і переущільнення ґрунту.

6. Експериментально підтверджено зростання на 20...35% (що становить 5-7 потужностей заряду) глибини ущільнення структурно-нестійкого ґрунту вибухом накладних зарядів спінених вибухових композицій на основі обробленої ультразвуком селітри у порівнянні з ігданітом.

7. Керування параметрами вибухового імпульсу шляхом використання ВР регульованої щільності забезпечує можливість рівномірного ущільнення просядних структурно-нестійких ґрунтів на необхідну потужність та може бути використане при розмінуванні мінних полів.

8. Отримані результати компресійних досліджень свідчать про те, що щільність значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості структурно-нестійких ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів. Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого

дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних структурно-нестійких ґрунтів.

9. Розроблено пристрій та запропоновано спосіб приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту, який включає змішування ПАР з водою, введення аміачної селітри, перемішування суміші механічним шляхом, який з метою інтенсифікації процесу аерації великих об'ємів продукту і підвищення безпеки робіт, механічне змішання розчину ПАР і селітри проводять в низькошвидкісному режимі без спінювання суміші, подачею цієї суспензії під тиском до об'єкта проведення підривних робіт та дозованою аерацією її за рахунок ежектування повітря потоком суміші з прямоочною видачею спіненого вибухового композиту на місце застосування.

10. Застосування даного способу можливо: для розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100 – 200 м. За один цикл з покриттям шару піносуспензії 50 – 70 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою ДШ; для розмінування пересіченої місцевості шляхом створення заряду об'ємного вибуху за допомогою пінного ствола, заповненням піносуспензією виїмки в ґрунті або м'якій оболонці і підривом такого заряду нитками ДШ; для ущільнення ґрунту злітних смуг на польових аеродромах шляхом переміщення пінного ствола уздовж злітної смуги з покриттям шару піносуспензії 50 – 100 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і підривом вибухового композиту ниткою ДШ; для розмінування мінних полів шляхом переміщення пінного ствола уздовж мінного поля смуги з покриттям шару піносуспензії 50 мм смужки поля шириною 10 м і підривом вибухового композиту ниткою ДШ.

11. Загальний економічний ефект від впровадження запропонованого способу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів на ділянці розміром 10×10 м, глибиною просадної товщі 25 м у порівнянні з відомим способом цементацією становить 12163,4 грн. або 32,3 %.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково - дослідною роботою, у якій на основі розробки вдосконалених малощільних спінених вибухових композицій з керованими вибуховими параметрами, встановлених закономірностей ступеня ущільнення структурно-нестійкого ґрунту під час вибуху накладних та свердловинних зарядів різних типів ВР, залежності величини пористості і утримуючої здатності різних типів АС та від впливу ультразвукового випромінювання, вирішено актуальну задачу удосконалення вибухової технології ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. На основі термодинамічних розрахунків запропоновано вдосконалені рецептури компонентного складу малощільних спінених вибухових композицій місцевого приготування на основі аміачної селітри (АС), розчину поверхнево-активної речовини (ПАР) і алюмінієвої пудри, які відрізняються значною фізичною стабільністю, а встановлені динамічні характеристики забезпечують підвищення ефективності застосування вибухового методу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів.

2. Обробка гранул АС ультразвуковим випромінюванням призводить до її ущільнення та підвищення утримуючої здатності. Причому, при наростанні впливу ультразвукового випромінювання до 4 хвилин, ці показники сягають максимуму: загальна пористість зменшується на 0,7% для щільної АС і на 1,1% для пористої АС, а утримуюча здатність збільшується на 5,2 % для щільної АС і 6,424 % для пористої АС. Подальше збільшення часу обробки АС ультразвуком призводить до зменшення її утримуючої здатності. Ця закономірність спостерігається як для пористої, так і для щільної АС.

3. Встановлено, що найменший піковий тиск на межі розподілу «продукти детонації – середовище» при найдовшій тривалості вибухового імпульсу спостерігається для зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням. Максимум тиску цих ВР менше

на 20-49%, а тривалість вибухового імпульсу довша в 3 – 3,5 рази порівняно зі стандартними малощільними ВР. Час зростання вибухового імпульсу зарядів на основі спінених ВР, як звичайних, так і оброблених ультразвуковим випромінюванням в 2,3 рази більший, ніж для амоніту №6 ЖВ і в 2,47 рази більший за ігданіт.

4. Результати проведених експериментів свідчать про те, що малощільні спінені заряди на основі АС/СФ/АП забезпечують ущільнення на глибину 1,5 – 3,0 м, що становить 27–30 потужностей заряду у порівнянні з ігданітом, що забезпечує ущільнення на глибину 1,25 – 2,0 м або 20 – 25 потужностей заряду. При свердловинному способі оптимальний кут нахилу свердловини знаходиться в межах від 20° до 30°. Ущільнення ґрунтового масиву накладними зарядами потужністю 50, 75, і 100 мм забезпечує глибину ущільнення малощільною ВР відповідно на 25, 20 і 17 % більше, ніж стандартним ігданітом.

5. Встановлено, що характер ущільнення ґрунтів за допомогою енергії вибуху носить пульсуючий характер, який затухає по мірі проходження крізь масив. Характер самої амплітуди пульсації щільності залежить від параметрів імпульсу ВР, тобто, чим менший тиск на фронті детонаційної хвилі і більша тривалість його зростання у вибуховому імпульсі, тим більша амплітуда. А це, в свою чергу, призводить до більш тривалої дії газів продуктів детонації на оточуючий масив, а відповідно, і збільшення щільності.

6. Отримані результати компресійних досліджень свідчать про те, що щільність значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості структурно-нестійких ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів. Цю характерність доцільно застосувати при визначенні необхідного ступеня ущільнення, регулювання якого дозволить встановити необхідні показники деформаційних характеристик для забезпечення стійкості просадних структурно-нестійких ґрунтів.

7. Розроблено пристрої та запропоновано способи приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту безпосередньо на місці проведення робіт.

8. Застосування даного способу можливо застосовувати: для розмінування місцевості шляхом човникового переміщення пінного ствола уздовж фронту робіт протяжністю 100 – 200 м за один цикл з покриттям шару піносуспензії 50 – 70 мм смужки ґрунту шириною 5 – 10 м і подальшим підривом вибухового композиту ниткою ДШ; для розмінування пересіченої місцевості; для ущільнення ґрунту злітних смуг на польових аеродромах; для розмінування мінних полів.

9. Загальний економічний ефект від впровадження запропонованого способу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів на ділянці розміром 10х10 м, глибиною просадної товщі 25 м у порівнянні з відомим способом цементациєю становить 12163,4 грн. або 32,3 %.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. В. Бойко та О. В. Ган, “Аналіз сучасних методів і способів усунення просадних властивостей лесових ґрунтів.” Перспективи розвитку гірничої справи та підземного будівництва. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» молодих вчених – аспірантів і магістрантів, VIII. 1-3 червня 2016р. Київ: НТУУ «КПІ». С. 95-99. Відновлено з [https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf\\_2016.pdf](https://geobud.kpi.ua/sites/default/files/conf_2016.pdf)
2. О. В. Аріон, Т. Г. Купач, та С. О. Дем’яненко, *Географія ґрунтів з основами ґрунтознавства*. (Навчально-методичний посібник). Київ: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2017.
3. А. К. Ларионов, В. А. Приклонский, та В. П. Ананьев, *Лёссовые породы СССР и их строительные свойства*. (ч. 1). Москва: Госгеолотехиздат, 1959.
4. В. В. Крамаренко, *Грунтоведение : учебник для среднего профессионального образования*. Москва : Издательство Юрайт, 2019. Востановлено из <https://urait.ru/bcode/442519>
5. А. М. Гальперин та В. С. Зайцев, *Геология: Часть IV. Инженерная геология*. (Учебник для вузов) Москва: Горная книга, 2011.
6. В.В. Аскалонов, *Силикатизация лессовых грунтов*. Москва: Госстройиздат, 1949.
7. Л. К. Смагулова, “Виды и способы закрепления грунтов”, *Молодой ученый*, №18, С. 80-83. 2017. Востановлено из <https://moluch.ru/archive/152/43141/>
8. О. І. Валовой, *Ефективні методи реконструкції промислових будівель та інженерних споруд*. (Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.) Кривий Ріг: Мінерал, 2003.
9. Л. М. Шутенко, О. Г. Рудь, та О. В. Кічаєва, *Механіка ґрунтів, основи та фундаменти*. (Пер. з рос.). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017.
10. Г. М. Бадьин, *Справочник технолога-строителя*. (2-е издание) СПб.: БХВ – Петербург, 2010.

11. С. И. Головкин, *Теория и практика усиления оснований методом высоконапорной цементации*. (Монография). Днепропетровск: Пороги, 2010.
12. Ю.М. Абелев и М.Ю. Абелев, *Основы проектирования и строительства на просадочных макropористых грунтах*. Москва: Стойиздат, 1968.
13. І. І. Назаренко, С. М. Польчина, та В. А. Нікорич, *Грунтознавство*. Чернівці: Книги – ХХІ, 2004.
14. А. Н. Богомолов, Ю. И. Олянский, Л. А. Анисимов, Е. В. Щекочихина, и А. Ф. Алексеев, “Подготовка оснований зданий и сооружений, строящихся на замедленно-просадочных грунтах I и II типа по просадочности”. *Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура*, 41 (60), С. 14–23. 2015.
15. В. Б. Швець, І. П. Бойко, Ю. Л. Винников, та М. Л. Зоценко, *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти*. Дніпропетровськ: Пороги, 2012.
16. Л. Р. Ставницер, *Оптимальное проектирование поверхностного уплотнения грунтов трамбующими плитами*. (Ч. 4). Новосибирск: Стройиздат, 1966.
17. П.А. Донченко, В.М. Коновал, та І.О. Пономаренко, “Дослідження і вибір оптимальних варіантів механізованих способів закріплення лесових ґрунтових основ”. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика* (ISSN 2413-6212), 9, С. 9-17. 2016.
18. М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлєв, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, та Ю.Л. Винников, *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти*. Полтава: ПНТУ, 2003.
19. В. И. Крутов, *Основания и фундаменты на просадочных грунтах*. Киев: Будивельник, 1982.
20. Л. Р. Ставницер, *Рекомендации по проектированию и устройству столбчатых фундаментов в котлованах, полученных трамбованием просадочных грунтов*. 1970.
21. Ю. М. Абелев, Простейший метод упрочнения лессовидных грунтов. *Строительная промышленность*, 10, С. 24 – 32. 1935.

22. А. П. Крутов, “Эффективность применения взрывов для уплотнения водонасыщенных малосвязных грунтов”. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*, 2. 2000. Востановлено из <http://georeconstruction.net/journals/02/9/9.htm>
23. В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, та В. В. Бойко, *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху*. (Монографія) Житомир: ЖДТУ, 2015.
24. Н. И. Казанский, *Упрочнение лессовидных грунтов в основании сооружений методом глубинного виброуплотнения*. Киев: АС и А УССР, 1962.
25. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. 2009.
26. А.М. Доныш, *Исследование методов проходки дренажных скважин для предварительного замачивания*. Новосибирск, 1966.
27. И.К. Самарин, *Расчет оснований гидротехнических сооружений*. Москва: Стойиздат, 1971.
28. В.И. Крутов, “О начальной влажности лессовых грунтов” в кн. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. Киев. Будівельник, 1971, С. 122–125.
29. А.А. Мустафаев, *Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах*. Москва: Стойиздат, 1979.
30. Ф.И. Кучерявий и Ю.Ф. Кучерявий, *Управление сейсмическим действием массовых взрывов на карьерах*. Киев: общество «Знания» УССР, 1978.
31. О.А. Вовк Г.І. Чорний, та А.В. Михайлюк, “Основные закономерности взрывов зарядов с воздушными оболочками в грунтах” в кн. *Использование взрыва в народном хозяйстве*. Киев: Наук.думка, 1970, ч.3.
32. R. L. Kondner, “Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils”. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, 89(SM1): pp. 115-141, 1963. Доступно: <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0013011>.
33. В.В. Мельников и Г.В. Рыков, “Экспериментальное исследование напряженно – деформируемого состояния лессового грунта различной

влажности при действии взрыва”, *ПМТФ* №1. С. 148-152, 1966. Доступно: <http://www.sibran.ru/upload/iblock/5f1/5f15c1fde4e4b978903f313bd9b811a9.pdf>

34. С.С. Григорян, Г.М. Ляхов, В.В. Мельников и др., “Взрывные волны в лёссовидном грунте”, *ЖПМТФ*, № 4, С. 35-39. 1963.

35. Г.М. Ляхов, *Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах*. М.: Недра, 1964.

36. Г.М. Ляхов и Я.А. Пачепский, “Об учете вязких и пластических свойств при решении волновых задач”, *ЖПМТФ*, № 2, С. 114-120. 1973.

37. А.А. Вовк, “Становление и развитие в Украине исследований по прикладной геодинамике взрыва”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 17, С. 9–24. (2008).

38. О. О. Вовк, *Вибух*. Київ: Наук. думка, 1973.

39. А. А. Вовк, А. Г. Смирнов, и В. Г. Кравец, *Динамика водонасыщенных грунтов*. Киев: Наукова думка, 1975.

40. А. А. Вовк, *Основы прикладной геодинамики грунтов*. Киев: Наукова думка, 1976.

41. И. А. Лучко и В. А. Плаксий, *Прикладные задачи динамики грунтов*. Киев: Наукова думка, 1979.

42. В. Г. Кравец, *Динамика уплотнения грунтового массива взрывом*. Киев: Наукова думка, 1979.

43. Г. И. Черный, *Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках*. Киев: Наукова думка, 1979.

44. В. Г. Кравец, Н. С. Грищенко, и Л. И. Демещук, *Формирование инженерных свойств грунтов взрывными методами*. Киев: Наукова думка, 1983.

45. А. Г. Смирнов, и И. С. Бержишкис, *Использование взрыва при строительстве сооружений в водонасыщенных грунтах*. Москва: Недра, 1984.

46. А. А. Вовк и Б. В. Замышляев, *Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок*. Киев: Наукова думка, 1984.

47. В. Г. Кравец, И. А. Лучко, и А. В. Михалюк, *Использование взрыва в мелиоративном строительстве*. Москва: Недра, 1987.

48. И. А. Лучко, В. А. Плаксий, и Н. С. Ремез, *Механический эффект взрыва в грунтах*. Киев: Наукова думка, 1989.
49. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, А. С. Марченко, и Р. Т. Темирбулатов, *Геомеханика и ее практические приложения*. Киев: Ин-т геофизики им. Субботина АН УССР, 1989.
50. A. A. Kuzmenko, V. D. Vorobev, I. I. Denizyuk, and A. A. Dauetas, *Seismic effects of blasting in rock*. Oxford and IBN Publishing Co. Pvt. Ltd.: New Delhi, 1993.
51. А. В. Бруякин, и В. Д. Воробьев, *Буровзрывные работы в строительстве. Краткий справочник*. Киев: Будивельник, 1993.
52. З. В. Барановский, А. А. Вовк, и В. Г. Кравец, *Вопросы защиты поверхностных зданий и сооружений на обрабатываемых территориях*. Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 1996.
53. А. А. Вовк и З. В. Барановский, *Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях*. Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 1996.
54. H. Chudek, W. Krawiec, i A. Wowk, *Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstępow górotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeżnym obszarze niecki obniżeniowej*. Gliwice: Wydawnictwo politechniki śląskiej, 2003.
55. В. С. Прокопенко и К. В. Лотоус, *Взрывание горных пород скважинными зарядами взрывчатых веществ в рукавах*. Киев: Политехника, 2006.
56. НПАОП 0.00-1.66-13, *Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення*. Київ: ДП «Редакція журналу «Охорона праці», 2013.
57. ДСТУ 4704:2008, *Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки*. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
58. ДСТУ 7116:2009, *Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд*. Київ: Держспоживстандарт України, 2010.
59. В. Г. Кравець, В. В. Коробійчук, та В. В. Бойко, *Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху*. (Монографія). Житомир : ЖДТУ, 2015.

60. П. З. Луговий, І. І. Анік'єв, та Є. О. Сущенко, “Визначення та аналіз ударних і сейсмічних навантажень на об'єкт під дією вибуху”. *Проблеми охорони праці в Україні*, 3, С. 63–68. 2000.

61. Э. И. Ефремов, Б. И. Римарчук, и В. Я. Шварцер, “Совершенствование простейших взрывчатых смесей на основе аммиачной селитры и нефтепродуктов”. *Вестник КДПУ*, 2, 81–84. 2006.

62. Е. В. Колганов и В. А. Соснин, *Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества*. (1-я книга). Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.

63. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, та Т. П. Кудря, *Создание простейших взрывчатых составов местного приготовления с регулируемой плотностью*. Киев: Препринт ИГФ им. С. И. Субботина АН УССР, 1988.

64. О. О. Вовк та В. І. Плужник, “Створення нового класу промислових вибухових речовин зі змінною густиною”. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*, 16, С. 33–42. 2008.

65. В. И. Плужник, Т. Н. Пивоварова, и А.А. Вовк, “Взрывчатый состав”. А. с. СССР № 1166465, МКИ4 С06В 31/28. Заявл. 28.04.1984.

66. В. И. Плужник, Т. П. Кудря, та А. А. Вовк, “Взрывчатый состав”. А. с. СССР №1064611, МКИ4 С06В 31/28. 1982.

67. В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравець, та А. Л. Ган, “Спосіб приготування та добір компонентного складу спінених вибухових композицій для ущільнення просадних ґрунтів”. *Технічна інженерія*, 2(84), С. 126–132. 2019. doi.org/10.26642/ten-2019-2(84)-126-132

68. M. Shakeran and A. Eslami, “Geotechnical Aspects of Explosive Compaction”. *Shock and Vibration*, 2016(2), pp. 1-14. 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6719271>

69. В. А. Флорин, *Явления разжижения и способы уплотнения рыхлых водонасыщенных оснований*. Изв. АН СССР. ОТН, 6, 1952.

70. П. Л. Иванов, *Уплотнение несвязных грунтов взрывом*. Ленинград: Стройиздат, 1967.

71. Г. М. Ляхов, *Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах*. Москва: Недра, 1974.
72. И. М. Литвинов, *Глубинное укрепление и уплотнение просадочных грунтов*. Киев. Будівельник, 1969.
73. О. Р. Minaev, "Effective Blasting Method of Compacting Sand Foundation Beds for Various Structures". *Power Technology and Engineering*, 51, pp. 507-512. 2018. doi.org/10.1007/s10749-018-0864-x
74. Н. В. Зуєвська, С. В. Зайченко, В. В. Вапнічна, та Л. В. Шайдецька, *Ресурсозберігаючі технології при будівництві геотехнічних об'єктів*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
75. Г. Г. Фаренюк, *Ущільнення ґрунтів гідровибухом*. 2017. [Ел.видання]. Доступно: [http://www.niisk.com/strukturni\\_pidrozdili/zaporizke\\_viddilennja/ushchlnennya-grunt-v-g-drovibukhom.php?clear\\_cache=Y](http://www.niisk.com/strukturni_pidrozdili/zaporizke_viddilennja/ushchlnennya-grunt-v-g-drovibukhom.php?clear_cache=Y)
76. *Рекомендации по проектированию и производства работ ускоренным уплотнением просадочных лессовых грунтов большой мощности предварительным замачиванием и глубинными взрывами*. Киев: НММСК Госстоя СССР, 1976.
77. В. В. Бойко, А. Л. Ган, та О. В. Ган, "Ущільнення просадних ґрунтів вдосконаленими зарядами малої щільності". *Збірник наукових праць НГУ. Днепр: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»*, 55, С. 152-162. 2018. Доступно: <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2018/55/17.pdf>
78. А. П. Глазкова, *Катализ горения взрывчатых веществ*. Москва: Наука, 1976.
79. С. А. Мельникова, "О влиянии поверхностно-активных веществ на физико-химические и взрывчатые свойства игданитов". *Взрывное дело*, 65/22, С. 30-35. 1968.
80. А. В. Куприн, И. Л. Коваленко, Л. В. Довбань, та А. Г. Теплицкая, *Термическое поведение аммиачной селитры как основы современных взрывчатых веществ. Высокоэнергетическая обработка материалов*. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2009.

81. В. П. Купрін, І. Л. Коваленко, М.І. Іщенко, та В.Ф. Монаков, *Розробка і впровадження емульсійних вибухових речовин на кар'єрах України*. Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012.

82. В. К. Тихомиров, *Пены. Теория и практика их получения и разрушения*. Москва: Химия, 1983.

83. В. С. Білецький, (Ред.), *Мала гірнича енциклопедія*, Т.3. Донецьк : Схід. видав. дім, 2013.

**84.** В. В. Бойко, О. В. Ган, В. Г. Кравець, та А. Л. Ган, “Вплив ультразвукового випромінювання на динамічні характеристики спінених вибухових композицій”. *Збірник наукових праць НГУ*, 59, С. 56–65. 2019. doi.org/10.33271/crpnmu/59.056

85. А. А. Абрамчук, *Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение*. Ленинград: Химия, 1981.

86. НПАОП 0.00-1.67-13. *Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні*. Київ: Індустрія, 2013.

**87.** О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Вапнічна, та Л. В. Шайдецька, “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення”. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 6(119), С. 99-105. 2019. doi: 10.30929/1995-0519.2019.6.99-105

88. О. П. Виноградова, “Руйнування гірських порід інструментом з функціональними елементами із композиційних алмазовмісних матеріалів”, дис. канд. тех. наук., Національний Технічний Університет України "Київський Політехнічний Інститут", Київ, Україна, 2015.

89. В. М. Орловський, (Ред.). *Технология аммиачной селитры*. Москва: Химия, 1978.

90. В. В. Вапнічна, А. Л. Ган, та О. С. Васильчук, “Вплив ультразвукового опромінення на утримуючу здатність аміачної селітри”, *ВІСНИК Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2 (80), С. 181–188, 2018.



91. ГОСТ 33832-2016 *Селитра аммиачная и удобрения на ее основе. Метод определения пористости*. Москва: Стандартинформ, 2016.
92. ГОСТ 25336-09 *Посуда и оборудование лабораторные стеклянные*. Москва: Стандартинформ, 2009.
93. ГОСТ 3826-03 *Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками*. Москва: Стандартинформ, 2003.
94. Паспорт УЗГ5-1,6/22 Генератор ультразвуковой. 1976. Доступно: <http://www.prompassport.ru/index.php/prochie-pasporta/bloki-chpu-uchpu-uci/1634-uzg5>
95. М. А. Промтов, *Кавитация*. 2006. Доступно: <http://www.tstu.ru/r.php?r=structure.kafedratasort=taid=3>.
96. Л. Бергман, (Пер. с нем. под ред. Григорьева, В.С., Розенберга, Л.Д.) *Ультразвук и его применение в науке и технике* (2-е изд.) - Москва: Иностранная литература, 1957.
97. О. В. Ган, А. Л. Ган, В. В. Бойко, В. Г. Кравець, та В. В. Вапнічна “Зміна пористості та утримуючої здатності аміачної селітри під впливом ультразвукового опромінення” у II Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми геоінженерії та підземної урбаністики», 30.05.2019, Київ; [Електроний ресурс] Доступно: <https://geobud.kpi.ua/conference/problemgeoinghenerii2/772>
98. О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, В. В. Полисадова, и А. П. Зыкова, *Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов*. (Учебное пособие). Томск: Томский политехнический университет, 2008.
99. А. Воєводка, О. О. Фролов, и В. Г. Кравець, “Ультразвуковая обработка гранулированной аммиачной селитры как средство стабилизации детонации промышленных зарядов”. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"*, 5, С. 49-51. 2015.

100. І. І. Ваганов, І. В. Маєвська, та М. М. Попович, *Інженерна геологія та охорона навколишнього середовища*. Вінниця: Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), 2013.
101. ГОСТ 5984-99. *Вещества взрывчатые. Методы определения бризантности*. 1999.
102. В. Н. Охотин, “Автомодельное распределение параметров за фронтом детонационной волны”. *Прикладная механика и техническая физика*, 1, С. 109-113. 1984.
103. М. А. Кук, *Наука о промышленных взрывчатых веществах*. Москва: Недра, 1980.
104. В. А. Даниленко и В. М. Кудинов, “Особенности потери устойчивости детонации в удлиненных зарядах”. *Физика горения и взрыва*, 2, С. 101-105. 1983.
105. А. Н. Дремлин, “Пульсирующий детонационный фронт”. *Физика горения и взрыва*, 4, С. 159-169. 1983.
106. В. С. Трофимов и В. А. Веретенников, *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978.
107. А. Н. Дремлин, В. С. Саврасов, В. С. Трофимов, та К. К. Шведов, *Детонационные волны в конденсированных средах*. Москва: Наука, 1970.
108. Н. Н. Казаков, *Разрушение горной породы ударным действием взрыва*. Москва: ИГД им. А. А. Скочинского, 1966.
109. O. Han, V. Boiko, V. Kravets, and A. Han, “Formation of parameters of foamed explosive mixtures for sealing soils”. *ScienceRise*, (5), pp. 6–12. 2020. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001430>
110. В. В. Бойко, О. В. Ган, та А. Л. Ган, “Дослідження параметрів вибухового імпульсу малоцільних вибухових сумішей для ущільнення просадних ґрунтів”. *Молодий вчений*, 12, С. 7-12. 2019. doi.org/10.32839/2304-5809/2019-12-76-2
111. Л. Н. Литвин, “О воздействии детонационной волны на оболочку заряда“, в кн. *Новые методы разрушения и механика горных пород*. Киев: Наукова думка, 1981. С. 136-140.

112. К. Вольраф и Г. Фомер, (Ред.). *Физика быстропотекающих процессов*. Т.1. Москва: Мир, 1971.
113. А. А. Вовк, (Ред.), *Управление действием взрыва в грунтах и горных породах*. Киев: Наукова думка, 1979.
114. М. А. Садовский, *Механический эффект подземного взрыва*. Москва: Недра, 1971.
115. А. А. Вовк, А. А. Дауетас и В. И. Плужник, “Перспективы применения бестропиловых водных гелів” в конф. *Пути совершенствования технологии добычи и переработки дорожностроительных материалов*. 1984, Каунас, С. 8-10.
116. А. А. Вовк, В. И. Плужник, та Н. Н. Казаков, “Взрывчатый состав”. А. с. 932785 СССР/, кл. СО6В 31/20, 1980.
117. Ф. И. Кучерявый, В. А. Чуриков, и И. В. Кривцов, “Заряд взрывчатого вещества”. Авт. Свид. № 1085348 СССР, 1968.
118. И. А. Лучко, В. А. Плаксий, Н. С. Ремез, *Механический эффект взрыва в грунтах*. Киев: Наук.думка, 1989.
119. Л. Д. Ландау и К.П. Станюкович, “Об изучении детонации конденсированных взрывчатых веществ”. *Докл. Академии наук СССР*, Т. 46, № 9, С. 112 - 117. 1945.
120. Н. С. Ремез, “Особливості деформування твердого багатокомпонентного в’язкопластичного середовища зі змінним коефіцієнтом в'язкості при динамічних навантаженнях”, *Вісник наукових праць НТУ України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць*, № 3, С. 34 - 39. 2000.
121. Р. Рихтмайер и К. Мортон. *Разностные методы решения краевых задач*. Москва: Мир, 1972.
122. І. А. Лучко, Н. С. Ремез, та А. І. Лучко, “Хвильові процеси в ґрунтових масивах під час вибухів нових сумішевих вибухових речовинах”, *Вісник наукових праць НТУ України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": Збірник наукових праць*, № 14, С. 24 - 30. 2006.

- 123 І. А. Лучко, Н. С. Ремез, та А. І. Лучко, *Математичне моделювання дії вибуху в ґрунтах і гірських породах*: монографія. К: НТУУ «КПІ», 2011.
124. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, и Л. И. Демещук, А. с. 572094 (СССР), МКИ Е02Д 3/10, УДК 624.5., 1976.
125. А. А. Вовк, В. Г. Кравец, Л. И. Демещук, и В. И. Плужник, А.с. № 4807541 (СССР). МКИ Е02Д 3/10, УДК 621.138.5., 1990.
126. В. С. Трофимов и В. А. Веретенников, *Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация*. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978.
127. Н. Н. Казаков, “Зависимость формы и длительности импульса взрыва от различных факторов”, *Взрывное дело*, 74/31, С. 105–112. 1974.
128. А. И. Гончаров и М. Ю. Корнилов, *Справочник по химии*. Киев: Вища школа, 1997.
129. М. Ф. Друкованный, В. М. Комир, и В. М. Кузнецов, *Действие взрыва в горных породах*. Киев: Наукова думка, 1973.
130. К. Вольраф и Г. Фомер, *Физика быстропотекающих процессов*. Т.2. Москва: Мир, 1971.
131. В.С. Білецький, (Ред.) *Мала гірнича енциклопедія. Т.1.* (ISBN 966-7804-14-3) Донецьк : Схід. видав. дім, 2004.
132. В. Б. Швець, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников, М.Л. Зоценко, О.О. Петраков, та С.В. Біда, *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти*. Дніпропетровськ: Пороги, 2014.
- 133.** В. В. Бойко, Ю. П. Приходько, В. К. Гончар, К. С. Золотухін, Ю. Ю. Орлов, В. І. Плужник, та О.В. Ган, “Пристрій для приготування водонаповненої вспіненої вибухової композиції”, патент на корисну модель UA № 122425, МПК: E21C 37/00, 10.01.2018.
- 134.** В. В. Бойко, Т. В. Хлевнюк, Л. В. Лавренов, О. В. Ган, та Ю. П. Приходько, “Спосіб приготування водонаповненого спіненого вибухового композиту для ущільнення ґрунтів та розмінування місцевості”, МПК E21C 37/00 F41H 11/00, UA № 140360, бюл. № 4, 25.02.2020. Доступно: <https://base.uipv.org/searchinv/search.php?action=viewdetails&IdClaim=266114>

135. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України (18.07.2013), Наказ № 469, Про затвердження Технічних правил ведення вибухових робіт на денній поверхні. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1320-13>

136. В. Г. Кравець, В. В. Бойко, А. Л. Ган, О. В. Ган, та О. С. Марченко, “Застосування енергії вибуху під час виконання спеціальних гірничо–будівельних робіт”, *науково–практичний журнал “Сучасна спеціальна техніка” МВС України ДНДІ*, № 2(61), С. 135–150. 2020. DOI: [doi.org/10.36486/mst2411-3816.2020.2\(61\)](https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2020.2(61))

137. Г. А. Симанович, О. Є. Хоменко, та М. М. Кононенко, *Руйнування гірських порід вибухом*. Дніпро: НГУ, 2014.

## ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
національного технічного  
університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
акад. НАН України, д.т.н., проф.  
Юрій ЯКИМЕНКО

« 28 » травня 2020 р.

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи інженера кафедри геоінженерії  
Ган О.В. у навчальний процес КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ми, що нижче підписалися, заступник Голови методичної комісії ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського О.В. Данілін, завідувач кафедри геоінженерії А.І. Крючков склали цей акт про те, що результати наукових досліджень кандидатської дисертаційної роботи Ган Олени Валеріївни «Вдосконалення зарядів спінених вибухових композицій для ущільнення структурно-нестійкого масиву» використовується у навчальному процесі Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського на кафедрі геоінженерії.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження та досягнутий фактичний ефект
Методи аналітичної оцінки керування параметрами вибухового імпульсу.	Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у вигляд розділів до лекційного курсу «Applied geophysics» («Прикладна геофізика») для студентів спеціальності 184 «Гірництво».
Ущільнення структурно-нестійких ґрунтів спіненими вибуховими композиціями.	Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у вигляд розділів до лекційного курсу «Спеціальні способи будівництва» для студентів спеціальності 184 «Гірництво».

В.о. завідувача кафедри  
геоінженерії, к.т.н., доцент

Анатолій Крючков

Заступник голови методичної  
комісії ІЕЕ,  
к.т.н., доцент

Олександр ДАНИЛІН



## Товариство з Обмеженою Відповідальністю «ЕКО-БУД-ТРЕЙД»

01042, м. Київ, вул. Чигоріна, 18, оф. 325  
ЄДРПОУ 39532133 ІПН 395321326559



ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор РОВ «ЕКО-БУД-ТРЕЙД»

В.І. ФАСТОВЕЦЬ  
20 червня 2020 р.

### АКТ

випробувань у виробничих умовах результатів кандидатської дисертаційної роботи Ган О.В. «Вдосконалення зарядів спінених вибухових речовин для ущільнення структурно-нестійкого масиву».

Комісія у складі:

- |                   |  |
|-------------------|--|
| 1. Барабаш І.О.   | начальник ВТВ                                |
| 2. Старченко І.О. | інженер                                      |
| 3. Ган О.В.       | інженер кафедри ГІ КПІ ім. Ігоря Сікорського |

#### 1. Об'єкт випробувань

Випробуванням у виробничих умовах підлягає дослідна ділянка структурно-нестійкого масиву розміром 10х10 м.

#### 2. Мета випробувань

Визначення ефективності застосування спінених вибухових композицій на основі аміачної селітри, сульфону та алюмінієвої пудри (АС/СФ/АП) для ущільнення структурно-нестійкого масиву.

#### 3. Результати випробувань

Початкова щільність ґрунту дослідної ділянки знаходиться в межах  $1,35-1,39 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Після ущільнення за допомогою спінених вибухових композицій визначена щільність ущільненого ґрунту на глибині 0,25 м від поверхні землі знаходиться в межах від  $1,68$  до  $1,76 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

#### 4. Висновки

Щільність ґрунту значно впливає на деформаційні і фізико-механічні властивості ґрунтів, збільшення якої забезпечує підвищення модуля загальної деформації і початкового тиску просідання, при цьому зменшується відносна стисливість та відносне просідання ґрунтів. Отримана щільність структурно-нестійкого масиву на глибині 0,25 м збільшилась на 24 % – 27 %. Така ступінь ущільнення забезпечує необхідну стійкість ґрунтового масиву. Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів досліджень Ган О.В. становить 12163,4 грн.

#### 5. Рекомендації

Запропонований метод ущільнення структурно-нестійких ґрунтів потребує відповідної механізації щодо приготування спінених вибухових композицій та заповнення на необхідну площу ущільнення ґрунтового масиву.

- |                   |  |
|-------------------|--|
| 1. Барабаш І.О.   | начальник ВТВ                                |
| 2. Старченко І.О. | інженер                                      |
| 3. Ган О.В.       | інженер кафедри ГІ КПІ ім. Ігоря Сікорського |

## Товариство з Обмеженою Відповідальністю «ЕКО-БУД-ТРЕЙД»

01042, м. Київ, вул. Чигоріна, 18, оф. 325  
ЄДРПОУ 39532133 ІПН 395321326559



ПІДПИСАНО  
Директор ТОВ «ЕКО-БУД-ТРЕЙД»

В.І. ФАСТОВЕЦЬ

*Сергій* 2020 р.

### РОЗРАХУНОК

**Очікуваного економічного ефекту від використання результатів дисертаційних досліджень роботи Ган О.В. «Вдосконалення зарядів спінених вибухових речовин для ущільнення структурно-нестійкого масиву», представлених на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.**

За базу при розрахунках економічного ефекту прийняті дані 2018-2019 років. Очікуваний економічний ефект від запропонованого в дисертаційній роботі нового способу ущільнення просадних структурно-нестійких ґрунтів з використанням енергії вибуху проведений відповідно до одного з найвідоміших способів закріплення ґрунтового масиву – цементация.

Для розрахунку загальної вартості була прийнята умовна ділянка просадного структурно-нестійкого ґрунту з розмірами в плані 10×10 м та глибиною ущільнення 25 м.

Економічний ефект розраховується за формулою:

$$E = [(C_1 + E_k K_1)A - (C_2 + E_k K_2)A]$$

де  $C_1$ ,  $C_2$  – собівартість закріплення 1м<sup>3</sup> ґрунтового масиву, грн;  $E_k$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень – 0,15;  $K_1$ ,  $K_2$  – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди відповідно у базовому та розрахунковому роках (у даному випадку  $K_1 = K_2$ ), грн;  $A$  – загальний об'єм ущільнюючого структурно-нестійкого ґрунту.

$$E = [37640 - 25476,6] = 12163,4 \text{ грн}$$

Інженер

Ірина Старченко